

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo



Jamova cesta 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

**DRUGG** – Digitalni repozitorij UL FGG  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Lavrač, R. 2012. Meritve infiltracije in vodoodbojnosti na različnih tipih tal. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Šraj, M., somentor Brilly, M.): 63 str.

University  
of Ljubljana

Faculty of  
Civil and Geodetic  
Engineering



Jamova cesta 2  
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

**DRUGG** – The Digital Repository  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Lavrač, R. 2012. Meritve infiltracije in vodoodbojnosti na različnih tipih tal. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Šraj, M., co-supervisor Brilly, M.): 63 pp.

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



Jamova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ  
PRVE STOPNJE VODARSTVA  
IN KOMUNALNEGA  
INŽENIRSTVA

Kandidat:

**ROŽLE LAVRAČ**

**MERITVE INFILTRACIJE IN VODOODBOJNOSTI NA  
RAZLIČNIH TIPIH TAL**

Diplomska naloga št.: 5/B-VKI

**MEASUREMENTS OF INFILTRATION AND WATER  
REPELLENCY ON DIFFERENT SOILS**

Graduation thesis No.: 5/B-VKI

**Mentorica:**  
doc. dr. Mojca Šraj

**Predsednik komisije:**  
doc. dr. Dušan Žagar

**Somentor:**  
prof. dr. Mitja Brilly

Ljubljana, 25. 09. 2012

## **STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA**

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

**IZJAVE**

Podpisani **Rožle Lavrač** izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom »**Meritve infiltracije in vodoodbojnosti na različnih tipih tal**«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 7. 9. 2012

Rožle Lavrač

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>556.14(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Rožle Lavrač</b>
<b>Mentor:</b>	<b>doc. dr. Mojca Šraj</b>
<b>Somentor:</b>	<b>prof. dr. Mitja Brilly</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Meritve infiltracije in vodoodbojnosti na različnih tipih tal</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>diplomsko delo</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>63 str., 23 pregl., 52 sl., 4 pril.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>infiltracija, vodoodbojnost, meritve, WDPT, infiltrometer z dvojnimi obroči, minidisk infiltrometer, količnik hidravlične prevodnosti</b>

### **Izvelek**

Infiltracija je proces vstopanja vode v tla skozi površinski sloj tal. Meritve infiltracije na terenu izvajamo z infiltrometri. Za izračun količnika hidravlične prevodnosti na osnovi meritev pa lahko uporabimo različne metode. Infiltracija je odvisna od številnih vplivov. V nalogi smo posebno pozornost namenili vodoodbojnosti tal, ki predstavlja pojav odbijanja vode od površine in je prav tako odvisna od mnogih okoljskih vplivov.

Cilj naloge je bil izvesti meritve infiltracije na treh tipih zemljin in dveh različnih rabah tal, analizirati rezultate ter jih primerjati s študijami drugih raziskovalcev. Meritve infiltracije smo izvedli z mini disk infiltrometrom (MDI) in infiltrometrom z dvojnimi obroči (DRI). Drugi cilj naloge je bil opisati in izmeriti vodoodbojnost tal z testom vpivanja vodne kapljice v tla (WDPT) in novejšo metodo z uporabo minidisk infiltrometra (MDI). Z analizo rezultatov pa vse meritve med seboj primerjati in ugotoviti odvisnosti (korelacije). Meritve so bile izvedene na eksperimentalnem področju Glinščice na treh različnih tipih tal in dveh rabah tal v poletnem obdobju 2012.

Rezultati meritev so pokazali, da je infiltracija na travniku višja kot v gozdu na vseh treh tipih zemljin. Izračunani količnik hidravlične prevodnosti se z uporabo različnih metod razlikuje. Vodoodbojnost je bila določena na vseh treh tipih tal različnih teksturnih razredov in je bila dosti višja v gozdu, kakor na travniku. Analiza rezultatov je pokazala tesno korelacijo med vodoodbojnostjo in infiltracijo.

**BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

<b>UDC:</b>	<b>556.14(043.2)</b>
<b>Author:</b>	<b>Rožle Lavrač</b>
<b>Supervisor:</b>	<b>Assist. Prof. Mojca Šraj, PhD.</b>
<b>Cosupervisor:</b>	<b>Prof. Mitja Brilly, PhD.</b>
<b>Title:</b>	<b>Measurements of infiltration and water repellency on different soils</b>
<b>Document type:</b>	<b>Graduation thesis</b>
<b>Scope and tools:</b>	<b>63 p., 23 tab., 52 fig., 4 ann.</b>
<b>Keywords:</b>	<b>infiltration, soil water repellency, measurements, WDPT, double ring infiltrometer, MDI infiltrometer, hydraulic conductivity</b>

**Abstract**

Infiltration is a process of water entering soil from its surface. Field measurements of infiltration are performed with infiltrometers. Calculation of hydraulic conductivity can be done by different equations. Infiltration exhibits large spatial and temporal variability due to many affecting factors. One of those effects is soil water repellency (hydrophobicity). Water-repellent soils do not wet up spontaneously. The intensity and persistence of water repellency vary widely due to variability in individual or combined effects of environment.

The objective of the research study was to measure infiltration and water repellency of three different soils and two different land uses with different methods. The results were then compared with each other and with the results of other scientist. The infiltration was measured with mini disk infiltrometer and double ring infiltrometer. Water repellancy was determined by the water drop penetration time (WDPT) and a relatively new method with mini disk infiltrometer (MDI). Field measurments were performed on experimental watershed of Glinščica river in summer of 2012.

Comparing the results of measurements under both vegetation covers, infiltration on soil under grass was higher than on soil covered with forest. Different calculation methods of hydraulic conductivity gave different results. Repellency was determined in surface samples of all tree soils of different textural types. Repellency level was much higher for soils under forest than on soils under grass. The analysis of the results showed significant correlation between infiltration and repellency.

## **ZAHVALA**

Za pomoč in vse napotke pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorici doc. dr. Mojci Šraj.

Zahvalil bi se še svojim staršem, ki so me skozi življenje spodbujali, podpirali in mi pomagali na moji poti. Zahvaljujem se tudi vsem prijateljem, dekletu in vsem ostalim, ki so kakor koli prispevali k nastanku diplomske naloge.

**KAZALO VSEBINE**

<b>1 UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2 TEORIJA INFILTRACIJE</b> .....	<b>3</b>
2.1 SESTAVA TAL .....	3
2.2 GIBANJE VODE V TLEH .....	4
2.3 INFILTRACIJA V NEZASIČENIH POGOJIH .....	5
2.3.1 Opis retenzijske krivulje .....	8
2.3.2 Teorija izračuna hidravlične prevodnosti z mini disk infiltrmetrom (MDI) .....	8
2.3.3 Pomen infiltracije .....	12
2.3.4 Vplivi na infiltracijo .....	13
2.3.4.1 Padavine .....	13
2.3.4.2 Lastnosti tal .....	13
2.3.4.3 Vegetacija in biota .....	15
2.3.4.4 Naklon .....	15
2.3.4.5 Čas .....	15
2.4 MERITVE INFILTRACIJE .....	16
2.4.1 Razpršilni infiltrmetri .....	16
2.4.2 Cilindrični infiltrmetri .....	16
2.4.2.1 Infiltrimeter z enojnim obročem .....	17
2.4.2.2 Infiltrimeter z dvojnimi obroči (DRI) .....	17
2.4.3 Tlačni infiltrmetri .....	18
<b>3 TEORIJA VODOODBOJNOSTI</b> .....	<b>20</b>
3.1 NASTANEK VODOODBOJNOSTI TAL .....	20
3.2 VIRI VODOODBOJNOSTI TAL .....	21
3.3 UČINEK VODOODBOJNOSTI NA INFILTRACIJO .....	22
3.4 MERJENJE VODOODBOJNOSTI .....	24
3.5 PREPREČEVANJE VODOODBOJNOSTI .....	24
<b>4 METODE DELA IN MERITVE</b> .....	<b>25</b>
4.1 OPIS EKSPERIMENTALNEGA POREČJA .....	25
4.1.1 Padavine in podnebje .....	26
4.1.2 Geologija in pedologija .....	27
4.2 MERITVE .....	30
4.2.1 Merilna mesta .....	30
4.2.2 Prstni preizkus določanja teksture tal .....	31
4.2.3 Meritve infiltracije .....	33
4.2.3.1 Opis meritev infiltracije z MDI .....	33
4.2.3.1.1 Sestavni deli MDI .....	33
4.2.3.1.2 Delovanje MDI .....	34



4.2.3.1.3 Primer izračuna količnika hidravlične prevodnosti .....	34
4.2.3.2 Meritve infiltracije z DRI.....	37
4.2.3.2.1 Potek meritve .....	37
4.2.3.2.2 Izračun.....	38
4.2.4 Rezultati meritev infiltracije .....	39
4.2.4.1 Distrično rjava tla .....	39
4.2.4.2 Obrečno oglejna tla.....	43
4.2.4.3 Koluvalno psevdoglejna tla.....	45
4.2.4.4 Rezultati po Dohnalu.....	48
4.3 MERITVE VODOODBOJNOSTI.....	49
4.3.1 Test časa vpivanja vodne kapljice v tla (WDPT test) .....	49
4.3.2 Meritve vodoodbojnosti z MDI.....	50
<b>5 ANALIZA REZULTATOV.....</b>	<b>53</b>
5.1 ANALIZA MERITEV INFILTRACIJE.....	53
5.2 ANALIZA MERITEV VODOODBOJNOSTI.....	55
5.3 UGOTAVLJANJE MEDSEBOJNIH ODVISNOSTI MERITEV.....	58
<b>6 ZAKLJUČKI .....</b>	<b>62</b>
<b>7 VIRI.....</b>	<b>64</b>

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Oznake volumnov in mas elementov tal.....	3
Preglednica 2: Koordinate lokacij meritev (Atlas okolja, 2012) .....	30
Preglednica 3: Prstni preizkus teksture tal.....	33
Preglednica 4: Primer izračuna količnika hidravlične prevodnosti (Decagon Devices, 2012).....	35
Preglednica 5: Vrednosti van Genuchtenovih parametrov za 12 teksturnih razredov (Decagon Devices, 2012).....	36
Preglednica 6: Prikaz podatkov pri merjenju z dvojnimi obroči .....	39
Preglednica 7: Izračun $K$ pri meritvah z MDI na distrično rjavih tleh .....	40
Preglednica 8: Izračun statistik in primerjave $K$ pri meritvah z MDI na travniku in v gozdu ter $K$ pri meritvi z DRI na distrično rjavih tleh .....	42
Preglednica 9: Izračun $K$ pri meritvah z MDI na obrečno oglejnih tleh.....	44
Preglednica 10: Izračun statistik in primerjave $K$ pri meritvah z MDI na travniku in v gozdu ter $K$ pri meritvi z DRI na obrečno oglejnih tleh .....	45
Preglednica 11: Izračun $K$ pri meritvah z MDI na koluvialnih psevdoglejnih tleh. ....	46
Preglednica 12: Izračun statistik in primerjave $K$ pri meritvah z MDI na travniku in v gozdu ter $K$ pri meritvi z DRI na koluvialnem psevdogleju .....	47
Preglednica 13: Rezultati meritev z MDI po Dohnalu .....	48
Preglednica 14: Razredi vodoodbojnosti po Bisdomu in sodelavcih (1993) ( cit. Po Doerr, 1998).....	49
Preglednica 15: Razredi vodoodbojnosti pri meritvah z MDI (Robichaud in sod., 2008) .....	50
Preglednica 16: Rezultati meritev vodoodbojnosti na distrično rjavih tleh.....	50
Preglednica 17: Rezultati meritev vodoodbojnosti na obrečno oglejnih tleh .....	51
Preglednica 18: Rezultati meritev vodoodbojnosti na koluvialnih psevdoglejnih tleh .....	52
Preglednica 19: Razvrščene meritve infiltracije z MDI po prepustnosti .....	53
Preglednica 20: Razvrščene meritve infiltracije z MDI po prepustnosti po Dohnalu .....	53
Preglednica 21: Meritve infiltracije z DRI .....	54
Preglednica 22: Statistike WDPT meritve vodoodbojnosti .....	56
Preglednica 23: Statistike MDI meritve vodoodbojnosti.....	56

## KAZALO SLIK

Slika 1: Infiltracija vode v tla (Wang in sod., 1999: str. 272) .....	1
Slika 2: Količina vlage v talnem profilu v odvisnosti od globine in časa (Povzeto po Espinoza, 1999)	5
Slika 3: Shematski prikaz Darcyvega eksperimenta (Povzeto po Espinoza, 1999).....	5
Slika 4: Vpliv različnih premerov na kapilarni dvig (Povzeto po Espinoza, 1999) .....	7
Slika 5: Učinek sušenja in močenja na retenzijsko krivuljo (Povzeto po Maček, 2006: str. 11) .....	8
Slika 6: Tipičen graf retenzijske krivulje vode v tleh, temelječ na enačbi (20) (Povzet po van Genuchten, 1980: str. 894) .....	9
Slika 7: Graf relativne hidravlične prevodnosti v odvisnosti tlačne višine (Povzeto po van Genuchten, 1980: str. 894) .....	10
Slika 8: Cone vlaženja (Povzeto po Musy and Higy, 2004: str. 177) .....	11
Slika 9: Primer nastanka površinskega odtoka (Povzeto po Espinoza, 1999).....	13
Slika 10: Simulacija infiltriranja vode v tla z prikazom front vlaženja (Povzeto po Tuller in Or, 2008) .....	13
Slika 11: Teksturni trikotnik ameriške klasifikacije z kraticami (Povzeto po Repe, 2006, str. 259) ....	14
Slika 12: Evolucija hitrosti infiltracije in komulativne infiltracije skozi čas (Povzeto po Musy in Higy, 2004: str. 175) .....	15
Slika 13: Razpršilni infiltrometer (Povzeto po Chang, 2010: str. 29).....	16
Slika 14: Delovanje infiltrometra z dvojnimi obročema (Povzeto po Lili in sod., 2008) .....	17
Slika 15: Primer infiltrometra z dvojnimi obročema (Povzeto po Eijkelkamp, 2012).....	17
Slika 16: Primer tlačnega infiltrometra, levo z označenimi sestavnimi deli (Povzeto po Angulo- Jaramillo in sod., 2000: str. 2).....	19
Slika 17: Prikaz izločanja hidrofobnih snovi rastlin in gliv (Povzeto po Hallett, 2007).....	22
Slika 18: Padec retenzijske krivulje tal zaradi vpliva vodoodbojnosti (Povzeto po Hallett, 2007).....	23
Slika 19: Prstasti tok (angl. <i>finger flow</i> ) in njegov razvoj (Thuller in Or, 2008) .....	23
Slika 20: Položaj raziskovalnega območja (Pestotnik, 2011) .....	25
Slika 21: Histogram padavin Ljubljana-Bežigrad 1971-2000 z letnim povprečjem 1368mm(vir podatkov ARSO, 2012)Pokrovnost in raba tal.....	26
Slika 22: Raba tal obravnavanega območja (vir podlage: Geopedia, 2012) .....	27
Slika 23: Pedološka karta (Geopedia, 2012) .....	29
Slika 24: Pedološka karta z vrisanimi osmi vodotokov in označenimi merilnimi mesti (vir podlage: Atlas okolja, 2012) .....	30
Slika 25: Lokacije meritev z označenimi tipi tal (vir podlage: Atlas okolja, 2012).....	31
Slika 26: Postopek prstnega preizkusa za določanje teksture (Repe, 2006: str. 256).....	32
Slika 27: Primer prstnega preizkusa.....	32
Slika 28: Sestavni deli mini disk infiltrometra (Decagon Devices, 2012) .....	34

---

Slika 29: Primer grafa kumulativne infiltracije v odvisnosti od kvadratnega korena časa (Decagon Devices, 2012).....	35
Slika 30: Grafični prikaz izmerjenih hitrosti infiltracije z DRI infiltrometrom .....	39
Slika 31: Meritve z MDI na distrično rjavih tleh.....	41
Slika 32: Označena lokacija meritev na distrično rjavih tleh (prazen krog travnik, polni krog gozd) ..	41
Slika 33: Postavitev DRI na distrično rjavih tleh .....	42
Slika 34: Rezultat meritve infiltracije z dvojnimi obroči na distrično rjavih tleh.....	43
Slika 35: Meritve z MDI na obrečno oglejnih tleh .....	43
Slika 36: Označena lokacija meritev na obrečno oglejnih tleh (prazen krog travnik, polni krog gozd) 44	
Slika 37: Rezultat meritve infiltracije z dvojnimi obroči na obrečno oglejnih tleh .....	45
Slika 38: Meritve z MDI na koluvialnem psevdogleju.....	46
Slika 39: Lokacija meritev na koluvialnem psevdogleju (prazen krog travnik, polni krog gozd).....	47
Slika 40: Rezultat meritve infiltracije z dvojnimi obroči na koluvialnih psevdoglejnih tleh .....	48
Slika 41: WDPT meritev na vodoodbojnih tleh (Karnok in Tucker, 2002) .....	49
Slika 42: Meritev $K$ z MDI na vseh tipih tal.....	54
Slika 43: Rezultati vodoodbojnosti WDPT za vse tipe tal .....	55
Slika 44: Rezultati meritev vodoodbojnosti z MDI za vse tipe tal .....	56
Slika 45: Meritve vodoodbojnosti na distrično rjavih tleh .....	57
Slika 46: Meritve vodoodbojnosti na obrečno oglejnih tleh.....	57
Slika 47: Meritve vodoodbojnosti na koluvialnih psevdoglejnih tleh .....	58
Slika 48: Korelacija med meritvami vodoodbojnosti po obeh metodah.....	58
Slika 49: Korelacija med infiltracijo in vodoodbojnostjo po testu WDPT .....	59
Slika 50: Korelacija med infiltracijo in vodoodbojnostjo po testu MDI .....	59
Slika 51: Korelacija infiltracije po Dohnal in vodoodbojnosti po testu WDPT .....	60
Slika 52: Korelacija infiltracije po Dohnal in vodoodbojnosti po testu MDI.....	60

## **SEZNAM PRILOG**

**Priloga A: MERITVE INFILTRACIJE Z MINI DISK INFILTROMETROM NA DISTRIČNO  
RJAVIH TLEH**

**Priloga B: MERITEV INFILTRACIJE Z MINI DISK INFILTROMETROM NA OBREČNO  
OGLEJNIH TLEH**

**Priloga C: MERITVE INFILTRACIJE Z MINI DISK INFILTROMETROM NA  
KOLUVIALNO PSEVDOGLEJNIH TLEH**

**Priloga D: MERITVE INFILTRACIJE Z DVOJNIM OBROČEM (DRI)**

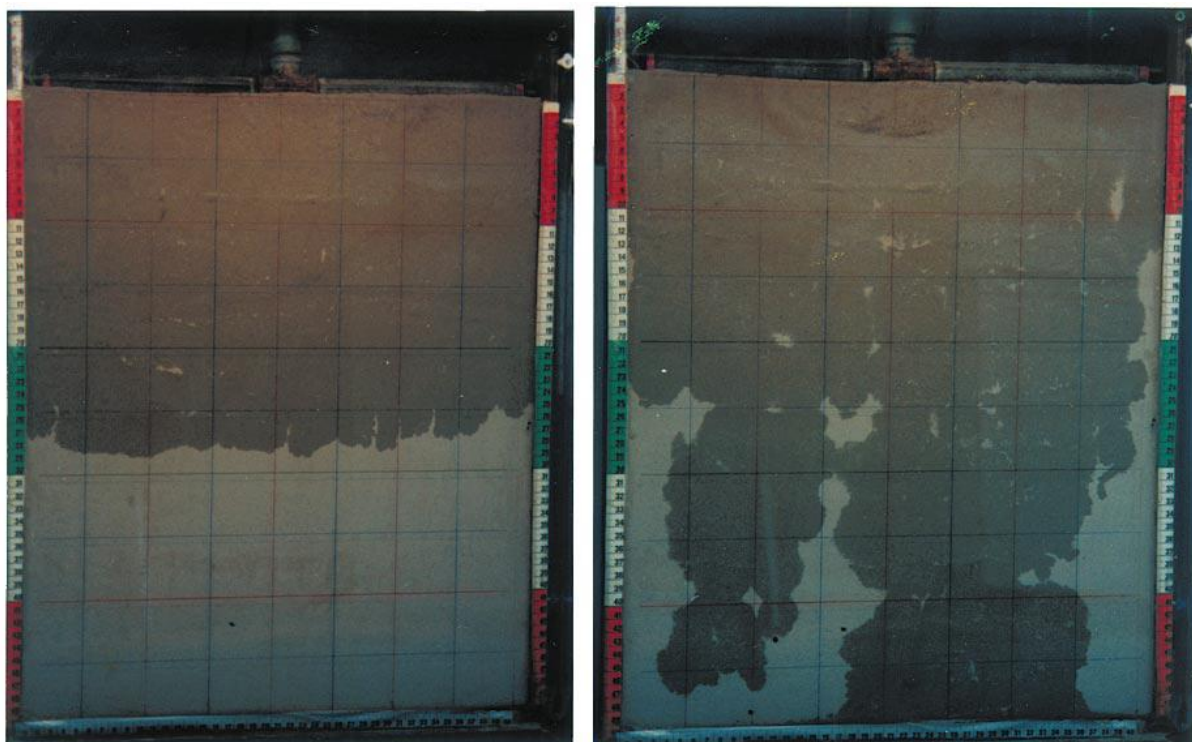
**KRATICE**

MDI	Mini disk infiltrometer
DRI	Infiltrometer z dvojnimi obroči (angl. <i>Double ring infiltrometer</i> )
WDPT	Test časa vpijanja vodne kapljice v tla (angl. <i>Water Drop Penetration Time</i> )
K	Koeficient hidravlične prevodnosti

## 1 UVOD

Voda je najpomembnejša snov na našem planetu in je potrebna za vse oblike življenja. Najdemo jo povsod na Zemlji, po kateri stalno kroži, se pretaka in potuje. Energijo za kroženje ji s sevanjem oddaja Sonce. Gibanje vode je znano kot vodni krog oz hidrolški krog. Krog opisuje neprestano kroženje vode v Zemljini hidrosferi.

Infiltracija je pomemben del hidrolškega kroga. Padavine, ki padejo na zemeljsko površino, v veliki meri površinsko odtečejo. Manjši del jo izhlapi, pojavu imenovanem tudi evapotranspiracija. Velik del odtoka pa se vpije v tla v procesu infiltracije. Infiltrirana voda lahko napolni vodonosnike, ki skladiščijo velike količine vode za dolgo časa (Slika 1). Nekaj infiltrirane vode pa ostane blizu površja in se kot podzemni tok lahko zlije v ocean ali pa na poti izvira na površje.



Slika 1: Infiltracija vode v tla (Wang in sod., 1999: str. 272)

Gibanje vode je eden izmed najpomembnejših procesov v zemljini. Določa ali vsaj vpliva na vse ostale procese v tleh od transporta, topljenja do biološke aktivnosti in rasti rastlin in ima vpliv tudi na ozračje. Modeli ki opisujejo gibanje vode v nezasičeni coni tal, so ključne komponente modelov, ki opisujejo in predvidevajo agronomske, hidrolške, ekološke in ekonomske učinke vplivov klimatskih sprememb (Fodor in sod., 2010).

Skozi zgodovino so znanstveniki postavili številne modele ravnotežja vode v tleh in so tako sčasoma razvili številne zapletene metode izračuna spremenljivk, parametrov gibanja vode. Ena izmed

pogostejših metod je uporaba retenzijske krivulje tal in izračun količnika hidravlične prevodnosti. Metoda prilagaja funkcijo določenim izmerjenim podatkom (Espinoza, 1999).

Zasičena hidravlična prevodnost je najpomembnejše lastnost tal, ki vpliva na tok vode v tleh (Zhang, 1997). Ta parameter je pomemben vhodni podatek hidroloških modelov in agrometeoroloških modelov. Natančnost rezultatov modelov je odvisna od natančnosti vhodnih podatkov. Hidravlična prevodnost pa je ena najbolj neenakomerno razporejenih spremenljivk v tleh. Njena vrednost sezonsko variira skozi čas. Največje neenakost je posledica nehomogenih tal (Fodor in sod., 2011). Znanstveni so odkrili tudi do trikratne spremembe vrednosti prevodnosti. Zaradi teh odstopanj so se odločili, da opravijo nekatere meritve infiltracije v laboratoriju in primerjajo rezultate z meritvami na terenu. Težave pri meritvah povzročajo tudi ujeti zračni žepi v tleh, ki preprečujejo popolno zasičenost tal, zato ima vsaka meritev že določeno napako. Vsaka terenska metoda upošteva določeno aproksimacijo, predpostavke ali posplošitev za izračun hidravlične prevodnosti.

Vodoodbojnost je pomemben pojav, ki zmanjšuje količino dosegljive vode. Vodoodbojnost tal je naraven pojav, ki ga povzročajo hidrofobne snovi. Kadar pride voda v stik z vodoodbojnimi tlemi, se tvorijo kapljice, le-te imajo značilno sferično obliko, saj je sila med molekulami vode večja od privlaka delcev (Doerr in sod., 2000). Pojav v nalogi opisane vodoodbojnosti je že danes velik problem človeštva in bo v prihodnosti postal še večji. V nekaterih delih sveta se proti vodoodbojnosti tal že borijo z dragimi ukrepi (Hallett, 2007). Pretekla človeška dejanja so zmanjšala količino uporabne vode na našem planetu. Z naraščanjem prebivalstva pa se povečuje potreba po vodi, tako pitni kot tudi po vodi potrebni v kmetijstvu. Voda bo v prihodnosti najpomembnejši naravni vir (Hallett, 2007).

Namen diplomske naloge je (i) opraviti meritve infiltracije in vodoodbojnosti z različnimi metodami, (ii) raziskati in določiti vpliv tal, rastlin in vodoodbojnosti na infiltracijo, (iii) primerjati rezultate meritev različnih metod in določili njihovo povezanost, če je le ta prisotna in (iv) pridobljene rezultate primerjati z znanimi rezultati drugih avtorjev.



## 2 TEORIJA INFILTRACIJE

Infiltracija je fizikalni pojav ponikanja vode v tla in je eden pomembnejših delov hidrološkega kroga. Količina infiltrirane vode v tla je povezana v distribucijski proces v nenasičeni coni. Infiltracija vode je odvisna od predhodne vlažnosti, vodnega pritiska in srka (Espinoza, 1999).

### 2.1 Sestava tal

Tla so geološko gledano sestavljena iz trifaznega sistema, ki vključuje trdne delce, tekočino in pline. Trdni delci so mešanica različnih mineralov in organskih snovi, ki predstavljajo ostanke živali in rastlin.

Namen tega odstavka je predstavitev osnovnih odnosov med posameznimi deli zemljine. Zemljina je sestavljena iz trdih delcev in praznih prostorov med njimi. Pore med delci lahko zapolnjuje voda ali zrak (Espinoza, 1999). Oznake posameznih elementov so predstavljene v preglednici 1.

Preglednica 1: Oznake volumnov in mas elementov tal

Element	Volumen	Masa
zrak	$V_z$	$m_z$
voda	$V_w$	$m_w$
zemlja	$V_s$	$m_s$
vzorec tal	$V$	$m$

- Celoten volumen je seštevek volumnov zraka, vode in trdne snovi (agregata):

$$V = V_z + V_w + V_s, \quad (1)$$

- Volumen por:

$$V_v = V_z + V_w, \quad (2)$$

- Poroznost je delež por v vzorcu tal:

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (3)$$

- Stopnja zasičenosti zemljine:

$$S = \frac{V_w}{V_v} \quad (4)$$

- Vlažnost, oz vsebnost vode je razmerje med maso vode in trdne snovi:

$$w = \frac{m_w}{m_s} \quad (5)$$

- Volumenski odstotek vode:

$$\theta = \frac{V_w}{V} \quad (6)$$

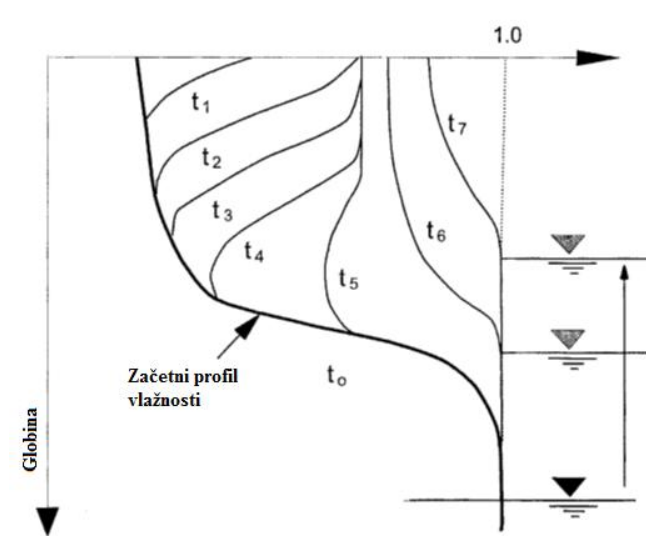
## 2.2 Gibanje vode v tleh

Gibanje vode v tleh je v nekaterih pogledih dokaj enostavno ter v drugih zelo kompleksno. Objekt, ki se lahko svobodno premika, je spontano nagnjen k teženju iz položaja z večjo potencialno energijo k položaju z manjšo potencialno energijo. Takšnemu premikanju sledi tudi volumen oziroma masa vode (Soil Physics, 2012).

Infiltracija je pojav vstopanja oziroma ponikanja vode v tla skozi zemljino površino (Espinoza, 1999). Voda v tleh se giblje v skladu z rezultanto vseh sil nanjo. Te sile so: sila gravitacije in sila kapilarnega privlaka, ter še sili hidravličnega pritiska in zunanjega zračnega pritiska (Soil Physics, 2012). Gravitacija sili vodo v premikanje navzdol, v globino tal. V nasprotno smer, navzgor pa jo silita sili adhezijskega privlaka vodnih molekul na delce zemljine in kohezijska sila oz. privlak vodnih molekul med seboj. Kohezijsko in adhezijsko silo skupaj imenujemo tudi kapilarna sila (Soil Physics, 2012). Kapilarna sila ustvarja nenasičeno cono v tleh, kjer je gibanje vode odvisno od količine vlage. To območje sega od površine tal do gladine podtalne vode. Pore med delci zemljine so napolnjene z zrakom ali vodo (Han, 2010).

Gibanje vode v zasičenih in nezasičenih tleh je različno, vendar so zasičeni pogoji prisotni samo med padavinami in takoj po njih. Ob zasičenih pogojih so vse pore zapolnjene z vodo (Sławiński in sod., 2004). V trenutku zasičenosti na gibanje vode vpliva samo še gravitacijska sila (Lili in sod., 2008).

Skozi zgodovino so se razvile številne analitične in polempirične enačbe za opisovanje enodimenzionalnega toka infiltracije vertikalno skozi homogena tla z določenimi začetnimi pogoji (Green in Ampt, 1911; Kostiaikov, 1932; Horton, 1940; Philip, 1957; Mein in Larson; Philip, 1984 in še mnogi drugi). Količina vode, ki se lahko infiltrira v tla, je neposredno vezana na vlažnostne pogoje v nenasičenih tleh. Čeprav večina modelov predvideva enotne vlažnostne pogoje za celotni profil, v resnici vlaga v tleh zelo variira. Tipični primer neenakomerne vlažnosti je prikazan na sliki 2, kjer se vidi tudi dvig gladine talne vode. Infiltracija poteka samo v nezasičenih tleh.



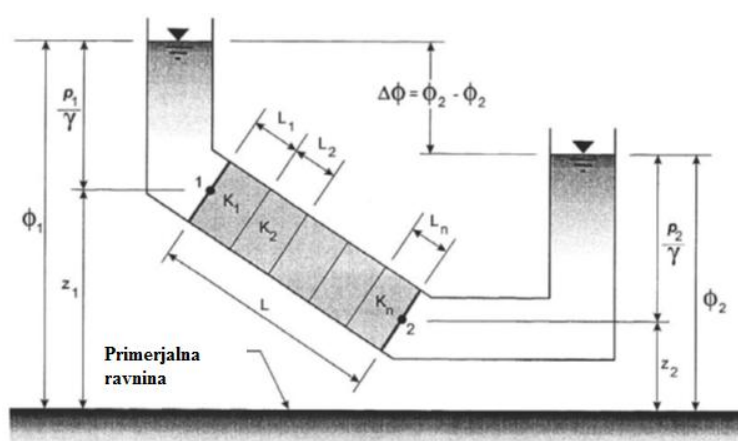
Slika 2: Količina vlage v talnem profilu v odvisnosti od globine in časa (Povzeto po Espinoza, 1999)

### 2.3 Infiltracija v nezasičenih pogojih

Prvi opis gibanja vode v tleh je podal Henry Darcy leta 1856 (Slika 3) (Espinoza, 1999). Darcyjev zakon zapišemo:

$$Q = K \cdot A \cdot I, \quad (7)$$

kjer je  $A$  površina zemljine, skozi katero teče voda,  $l$  dolžina vzorca,  $K$  koeficient hidravlične prepustnosti zemljine ali tudi Darcyev koeficient, ki ima za enoto [m/s],  $\Delta h$  sprememba piezometrične višine (tlaka vode) med začetkom in koncem vzorca in  $I$  hidravlični gradient (Steinman, 2010).



Slika 3: Shematski prikaz Darcyvevega eksperimenta (Povzeto po Espinoza, 1999)

Ker pa zemljina ni homogen material in zato ni stalnega toka, moramo enačbo razširiti za nestalni tok. Pomagamo si s uporabo kontinuitetne enačbe, ki razširi enačbo Darcy-ja:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} [K(\theta)(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1)], \quad (8)$$

kjer je:

$K$ ... hidravlična prevodnost,

$\theta$ ... volumska količina vode,

$\psi$ ... tlačna višina,

$z$ ... višina vode,

$t$ ... čas.

Številni znanstveniki gibanje vode v nezasičenih pogojih opisujejo različno. V literaturi predpostavljajo različne fizikalne lastnosti tal. Za izračun količnika hidravlične prevodnosti se tako uporabljajo različni pristopi in funkcije, imenujemo jih tudi pedotransferne funkcije. Vsak avtor predpostavlja določene lastnosti zemljine, na podlagi katerih temelji izračun. Merjenje hidravličnih lastnosti je težko, časovno zamudno in drago (Minasny, 2000). Z hitrim razvojem računalnikov in elektronike se množi število matematičnih in numeričnih metod, ki pa še niso nadomestile znanih terenskih empiričnih metod (Slawinski in sod., 2004).

Philip je predstavil rešitev infiltracijske kapacitete tal, začeni s pogoji za homogena tla z začetno enotno vlažnostjo in dodano vlažnostjo na površju ter izpeljal rešitev kumulativne infiltracije kot funkcije časa:

$$F(t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n(\theta) t^{\frac{n}{2}} + K_i t, \quad (9)$$

$$F(t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n(\theta) t^{\frac{n}{2}} + K_i t, \quad (10)$$

kjer je  $A_n$  funkcija volumske količine vode,  $K_i$  pa hidravlična prepustnost pri začetni količini vode. Z dodatnimi preizkusi je prišel do zaključka, da je začetna infiltracija v praksi odvisna samo od dveh parametrov. Oba parametra  $A$  in  $S$  sta odvisna od začetne vsebnosti vode v tleh in vlažnosti in se ju lahko določi z numerično integracijo:

$$f = S t^{\frac{1}{2}} + A t. \quad (11)$$

Na podlagi vseh predpostavk in enačb je Philip na koncu napisal končni obliki enačb za izračun infiltracije:

$$f = \frac{1}{2}St^{1/2} + A \quad \text{za } 0 \leq t \leq t_c, \quad (12)$$

$$f = Kt + t_c(K - A) \quad \text{za } t > t_c. \quad (13)$$

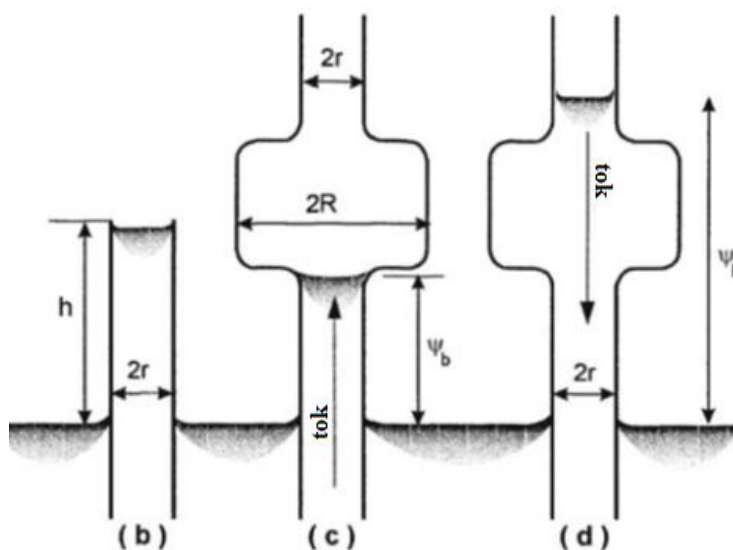
Philipovo enačbo dobljeno iz Richardove enačbe že poznamo (Philip, 1957):

$$I = C_1t^{0.5} + C_2t. \quad (14)$$

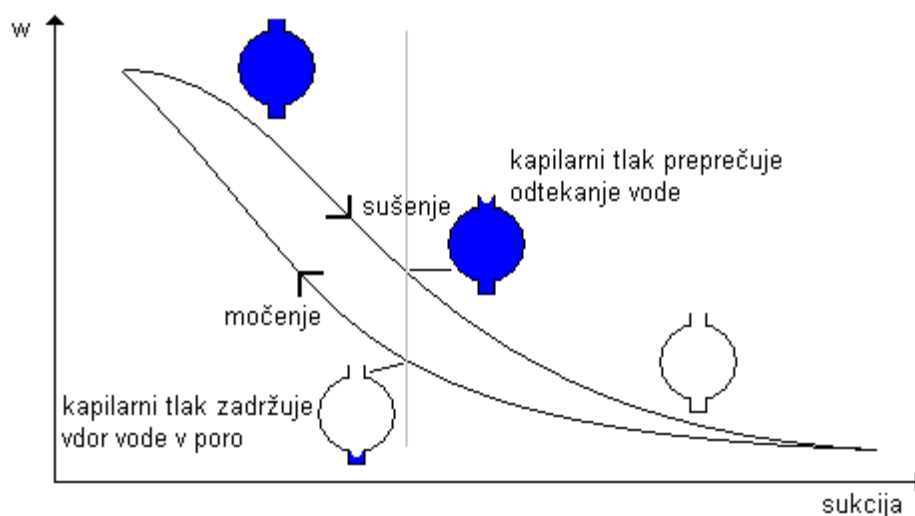
Nad gladino talne vode se voda nahaja zaradi kapilarnih sil, ker kapilarna sila deluje nasproti gravitacijskem toku, je njen predznak negativen (Espinoza, 1999). Podoben pojav lahko opazujemo pri dvigu gladine vode v kapilarnih cevkah (Slika 4). Za vertikalno kapilaro je kapilarni dvig določen z enačbo:

$$\psi_b = \frac{c}{r}, \quad (15)$$

kjer je  $c$  konstanta površinske napetosti za dano površino in tekočino in jo lahko zapišemo tudi kot  $2\gamma$ . Kapilarni dvig ne more biti večji od višine cevke. Enačba je dobljena iz ravnotežja v vertikalni smeri. V kapilarni cevki z neenakomernim premerom je pomembna smer dotekanja vode, spodaj ali zgoraj (Espinoza, 1999) (Slika 4). Kapilarni učinek povzroči razliko pri retenzijski krivulji, če zemljinu sušimo ali močimo. Ker imajo pore različne radije pri razširitvah, imajo zemljine dve različni retenzijski krivulji, kar je vidno na Slika 5. Pojav imenujemo histereza (Maček, 2006). Da bi lahko pravilno določili kapilarni dvig, je potrebno poznati zgodovino vlaženja tal.



Slika 4: Vpliv različnih premerov na kapilarni dvig (Povzeto po Espinoza, 1999)



Slika 5: Učinek sušenja in močenja na retenzijsko krivuljo (Povzeto po Maček, 2006: str. 11)

Čeprav je porozni medij lahko upoštevan kot skupek povezujočih cevk, pa vendar kapilarnega dviga ne moremo natančno izračunati s tako enostavno enačbo kot je enačba (15).

### 2.3.1 Opis retenzijske krivulje

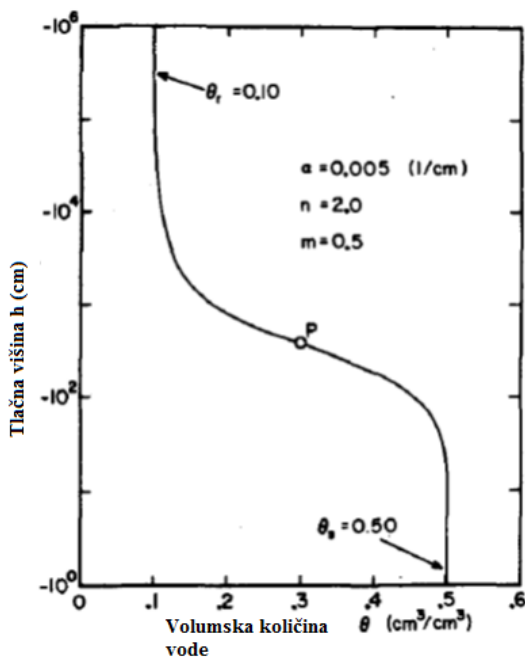
Kapilarni dvig ali srk je lahko določen kot pritisk, potreben za odstranitev vode iz vzorca zemljine. Številne študije so pokazale odvisnost srka od volumske vsebnosti vlage v tleh. Variiranje srka z volumsko vsebnostjo vlage v tleh imenujemo retenzijska krivulja vode. Skozi leta so jo znanstveniki opisovali z različnimi funkcijami (Espinoza, 1999). Ima tipično obliko simetrične S krivulje (van Genuchten, 1980). Z razumevanjem retenzijske krivulje vode v tleh lahko izračunamo prepustnost tal oziroma hidravlični količnik  $K$ . Hidravlični količnik je ena najpomembnejših karakteristik tal. Definiran je kot sposobnost prevajanje vode skozi pore in ostale prostore, ki so napolnjeni z zrakom v tleh (Mikoš in sod., 2002).

Zanesljive vrednosti hidravlične prevodnosti je zelo težko pridobiti, saj so prostorsko zelo spremenljive (van Genuchten, 1980). Količnik hidravlične prevodnosti je odvisen od viskoznosti in gostote tekočine, ter lastnosti poroznega medija (zemljine). Velikost in oblika por, teksturo tal in poroznost vplivajo na hidravlične lastnosti tal (Espinoza, 1999).

### 2.3.2 Teorija izračuna hidravlične prevodnosti z mini disk infiltrometrom (MDI)

Za merjenje hidravlične prevodnosti obstajajo številni instrumenti. V zadnjih letih je vse pogostejša terenska meritev s praktičnim mini disk infiltrometrom (Dohnal in sod., 2010). Sam instrument je opisan v 4.2.3.1.1 poglavju. Z iznajdbo instrumenta se je pojavilo tudi nekaj različnih tehnik uporabe in izračuna hidravlične prevodnosti. Instrument je bil že tudi uspešno avtomatiziran (Madsen in sod., 2007).

Enačbo za opis retenzijske krivulje vode (Slika 6) v nezasičenih tleh je napisal van Genuchten. Ta oblika enačba na podlagi funkcije vsebnosti vlage od tlačne višine, omogoča izračun relativne hidravlične prevodnosti.



Slika 6: Tipičen graf retenzijske krivulje vode v tleh, temelječ na enačbi (20) (Povzet po van Genuchten, 1980: str. 894)

Funkcijo za opis retenzijske krivulje vode je van Genuchten izpeljal iz enačbe Mualemovega modela:

$$K_r = \Theta^{\frac{1}{2}} \left[ \int_0^{\Theta} \frac{1}{h(x)} dx / \int_0^1 \frac{1}{(x)} dx \right]^2, \quad (16)$$

kjer je  $h$  tlačna višina, podana kot funkcija bredimenzijske vsebnosti vode.

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad (17)$$

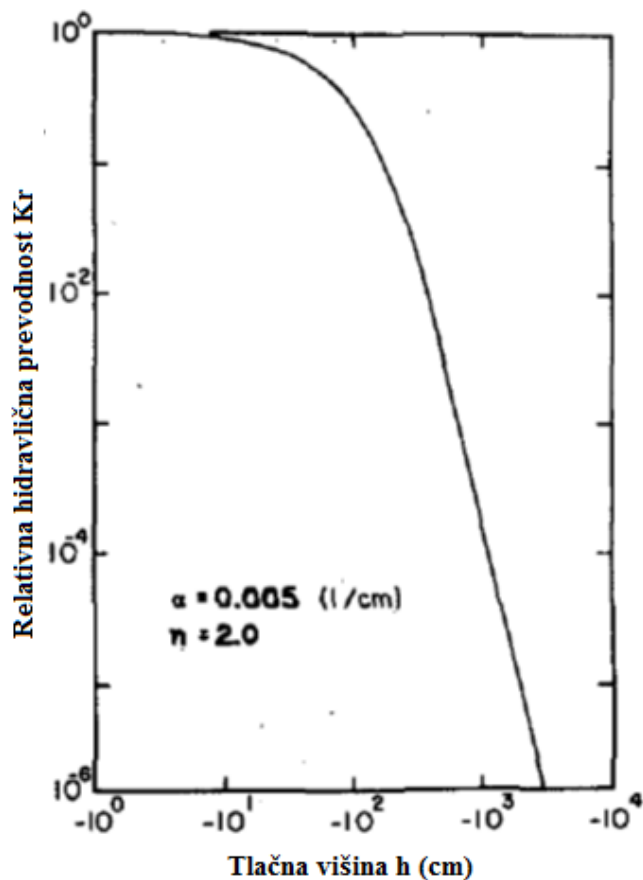
v tej enačbi indeksa  $s$  in  $r$  označujeta zasičeno (saturirano) in preostalo vsebnost vode v tleh. Preostalo vsebnost vode v tleh ali tudi vsebnost vlage v točki venenja je definiral pri veliki negativni vrednosti tlačnega pritiska oz.  $h = -15000$  cm. Za izračun hidravlične prevodnosti je v enačbo (17) vpeljal funkcijo in tri nove parametre:  $\alpha$ ,  $n$ ,  $m$ :

$$\Theta = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m. \quad (18)$$

S spretnim izpeljevanjem je uspel dobiti naslednjo enačbo:

$$K_r(h) = \frac{\{1 - (\alpha h)^{n-1}\} [1 + (\alpha h)^n]^{-m}}{[1 + (\alpha h)^n]^{\frac{m}{2}}} \quad (m = 1 - \frac{1}{n}). \quad (19)$$

Kakor je razvidno iz slike 7, hidravlična prevodnost hitro pada z zmanjševanjem tlačne višine.



Slika 7: Graf relativne hidravlične prevodnosti v odvisnosti tlačne višine (Povzeto po van Genuchten, 1980: str. 894)

Enačbo retenzijske krivulje kot funkcijo tlačne višine je podal v obliki:

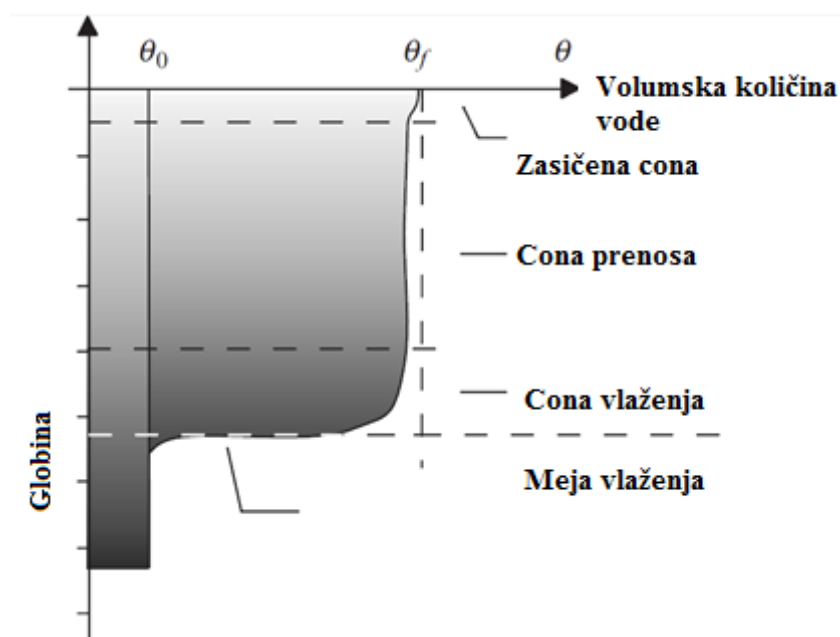
$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (20)$$

Dobljene grafe in rezultate je van Genuchten preveril tudi z meritvami na različnih tipih tal. Iz pridobljenih enačb je nato s pomočjo eksperimentalnih meritev določil tri vpeljane parametre in s tem dobil rešljiv sistem enačb. Saturirano in preostalo količino vode se pridobi s terenskimi meritvami. Parametra  $\alpha$  in  $n$  sta določljiva z dodatnimi transformacijami enačb in določevanjem naklona retenzijske krivulje (van Genuchen, 1980).

Začetna infiltracijska sposobnost je visoka zaradi privlaka vode na trde delce. Nato nastopi druga faza, ki jo narekujeta kapilarna in gravitacijska sila. Zračne mehurčke med porami voda vztrajno izpodriva, vendar nekaj zraka ostane ujetega med delci in zato relativna nezasičena hidravlična prevodnost hitro pada, dokler se tla ne zasičijo. Hiter padec je posledica kratkega obdobja, v katerem delujejo kapilarne sile do zapolnitve por z vodo (Lili in sod., 2000).



Vlažen profil tla je vertikalno delimo na različne cone (Slika 8). Prva, tanka plast ob površju je ob zadostni količini dotekajoče vode zasičena cona. Pod to cono se nahaja prehodna cona s hitro padajočim deležem vlage. Naslednja cona je cona prenosa, ki ima z globino spremenljivo vlažnost in sicer od 60 do 80 % vlažnosti. Najgloblje je cona vlaženja, ki predstavlja mejo med vlažnimi in relativno suhimi tlemi (Musy in Higy, 2011).



Slika 8: Cone vlaženja (Povzeto po Musy and Higy, 2004: str. 177)

Van Genuchtenove enačbe so pri raziskavah infiltracije zelo priljubljene. V zadnjih letih so bile narejene številne raziskave na različnih tipih tal in tako je nastala že obširna baza parametrov  $n$ ,  $\alpha$ ,  $\theta_s$ ,  $\theta_r$  za posamezne tipe tal (Porêbska in sod., 2006).

Nekateri znanstveniki iščejo povezave, korelacije van Genuchtenovih parametrov z deležem velikosti zrn, gostoto, vsebnostjo organske snovi (Rajkai in sod., 2004). Tem funkcijam rečemo tudi pedotransferske funkcije.

Izračun infiltracije z MDI temelji na metodi Zhanga, ki jo je predlagal 1997. Metoda je ena izmed mnogih, ki temelji na polempiričnem računu (Dohnal in sod., 2010).

Zhangova metoda je dokaj enostavna, saj za določitev koeficienta hidravlične prevodnosti merimo samo kumulativno (skupno) infiltracijo v odvisnosti od časa. Metoda je uporabna v pogojih suhih tal.

Stopnja infiltracije, izmerjene z MDI, je lahko aproksimirana s prvima dvema členoma Philipove razširitve (Philip, 1957). Ker je bila enačba originalno razvita izključno za enodimenzionalno infiltracijo, jo je potrebno za tridimenzionalno infiltracijo preurediti. Zhang je predlagal enostavni linearni izraz, ki poveže koeficienta  $C_1$  [m/s] in  $C_2$  [m/s<sup>1/2</sup>] s sorptivnostjo tal in hidravlično

prevodnostjo (Dohnal in sod., 2010). Proizvajalec MDI (Decagon Devices) za izračun predlaga naslednjo enačbo:

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

Hidravlična prevodnost tal je nato izračunana iz :

$$k = \frac{C_1}{A}, \quad (22)$$

kjer je  $C_1$  naklon krivulje kumulativne infiltracije v odvisnosti kvadratnega korena časa in  $A$  brezdimenzijski koeficient vezan na van Genuchtenove parametre za dana tla, izbran srk in radij diska infiltrometra (Decagon, 2012):

$$A = \frac{11.65(n^{0.1}-1)\exp[7.5(n-1.9)\alpha h_0]}{(\alpha r_0)^{0.91}} \text{ za } n < 1.9, \quad (23)$$

$$A = \frac{11.65(n^{0.1}-1)\exp[2.92(n-1.9)\alpha h_0]}{(\alpha r_0)^{0.91}} \text{ za } n \geq 1.9, \quad (24)$$

kjer so  $n$  in  $\alpha$  van Genuchtenovi parametri tal,  $r_0$  je radij diska in  $h_0$  je nastavljen srk infiltrometra.

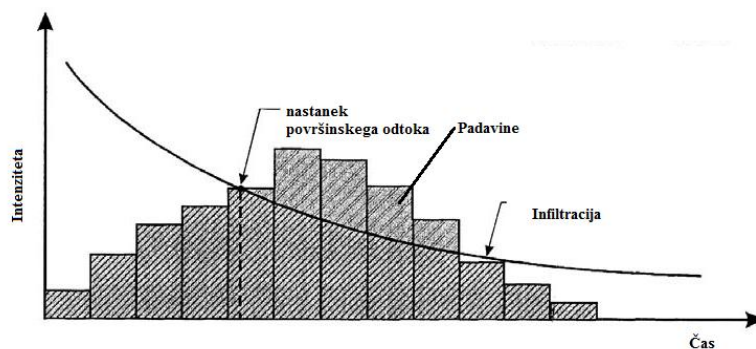
Pri meritvah v zemljinah s fino in drobno teksturo, kot sta na primer peščena glina in meljasta glina, z majhnim parametrom  $n$ , je Zhangovo enačbo popravil Dohnal (Dohnal in sod., 2010).

Za tla z  $n$  manjšim od 1.35 je predlagal novo enačbo (25), ki jo je sprejel tudi proizvajalec infiltrometra, saj so znanstveniki že dalj časa opazali napake pri meritvah v zemljinah z majhnim  $n$  (Vandervare in sod., 2000a),

$$K = \frac{C_2(\alpha r_0)^{0.6}}{11.65(n^{0.82}-1)\exp[34.65(n-1.19)\alpha h_0]}. \quad (25)$$

### 2.3.3 Pomen infiltracije

Infiltracijo smo že opisali kot proces vstopanja vode v tla. Stopnja infiltracije tako loči padavinsko vodo na dve hidrološko pomembni komponenti, površinski odtok in podpovršinski tok (Slika 9). Vrednosti obeh odtokov sta ključnega pomena pri hidrološkem modeliranju. Natančna določitev infiltracije povečuje varnost ljudi, saj lahko bolje predvidimo velikost poplav in izpiranje nevarnih snovi v tla, ter njihov transport (Diamond in Shanley, 1998).



Slika 9: Primer nastanka površinskega odtoka (Povzeto po Espinoza, 1999)

### 2.3.4 Vplivi na infiltracijo

Najpomembnejši faktorji, ki vplivajo na infiltracijo so: padavine, lastnosti tal, količina vode v tleh, vegetacija in biota ter naklon.

#### 2.3.4.1 Padavine

Padavine določajo količino vode na površju. Infiltracijsko sposobnost tal določa potencialni gradient na površini tal. Visoko začetno hitrost infiltracije povzroča relativno visok potencial v začetno suhih tleh. Začetni gradient se postopoma manjša z vlaženjem tal (Lili in sod., 2008).

Količina vode v tleh lahko vpliva na infiltracijo tako, da se le-ta zmanjšuje s večevanjem količine vode. Fronta vlaženja jasno loči suhi in vlažni del tal med infiltracijo (Slika 10).



Slika 10: Simulacija infiltriranja vode v tla z prikazom front vlaženja (Povzeto po Tuller in Or, 2008)

#### 2.3.4.2 Lastnosti tal

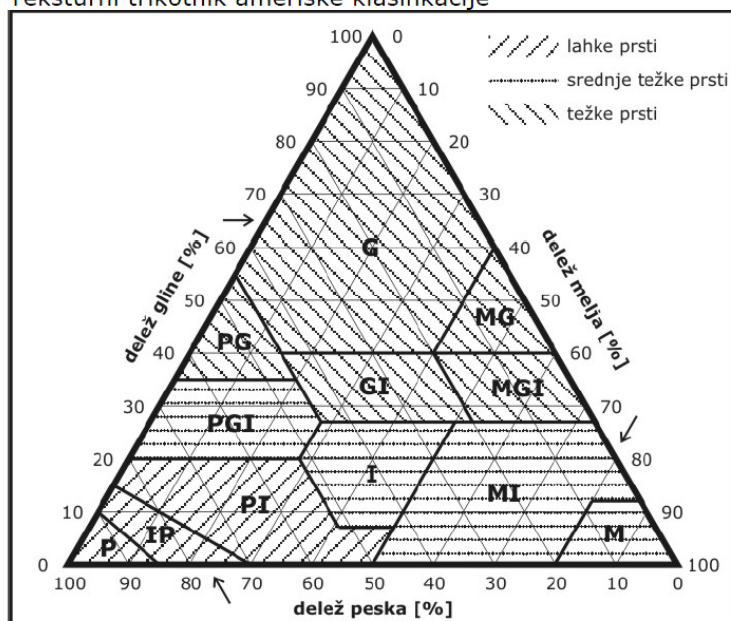
Hidravlična prevodnost, ki pogojuje infiltracijsko sposobnost, je odvisna tudi od lastnosti tal (Espinoza, 1999). Med pomembne lastnosti tal prištevamo teksturo in stabilnost tal, kemijsko sestavo

ter tudi razpoke na površini tal. Peščena tla z stabilnim agregatom imajo večjo infiltracijsko sposobnost kot meljasta tla. Nabrekanje glinenih delcev lahko še dodatno upočasnijo infiltracijo. Prisotnost makropor pa infiltracijsko sposobnost poveča (Lili in sod, 2008).

Tekstura tal je ena izmed osnovnih lastnosti, ki se jih redno določa na terenu ali v laboratoriju. Tla se razdelijo v razrede glede na občutek teksture, ter še dodatno z separacijo. Pomagamo si lahko z teksturnim trikotnikom (Slika 11) (Wikipedia, 2012). Na podlagi deleža posameznih velikostnih skupin peska, melja in gline, razvrstimo tla po U.S.D.A. klasifikaciji v 12 teksturnih razredov s pripisanimi kraticami:

- glina (angl. *clay*) G,
- peščena glina (angl. *sandy clay*) PG,
- meljasta glina (angl. *silty clay*) MG,
- meljasta glinasta ilovica (angl. *silty clay loam*) MGI,
- glinasta ilovica (angl. *clay loam*) GI,
- peščena glinasta ilovica (angl. *sandy clay loam*) PGI,
- meljasta ilovica (angl. *silt loam*) MG,
- peščena ilovica (angl. *sandy loam*) PI,
- pesek (angl. *sand*) P,
- ilovica (angl. *loam*) I,
- peščena ilovica (angl. *loamy sand*) PI,
- melj (angl. *silt*) M,

Teksturni trikotnik ameriške klasifikacije



Slika 11: Teksturni trikotnik ameriške klasifikacije z kraticami (Povzeto po Repe, 2006, str. 259)

### 2.3.4.3 Vegetacija in biota

Količina in vrsta rastlinstva in biote na površju tal vpliva na infiltracijo, saj lahko spreminja strukturo tal, zmanjšuje učinek padavin, zmanjšuje erozijo in površinski odtok. Običajno imajo poraščena tla večjo infiltracijsko sposobnost od golih (Lili in sod., 2008).

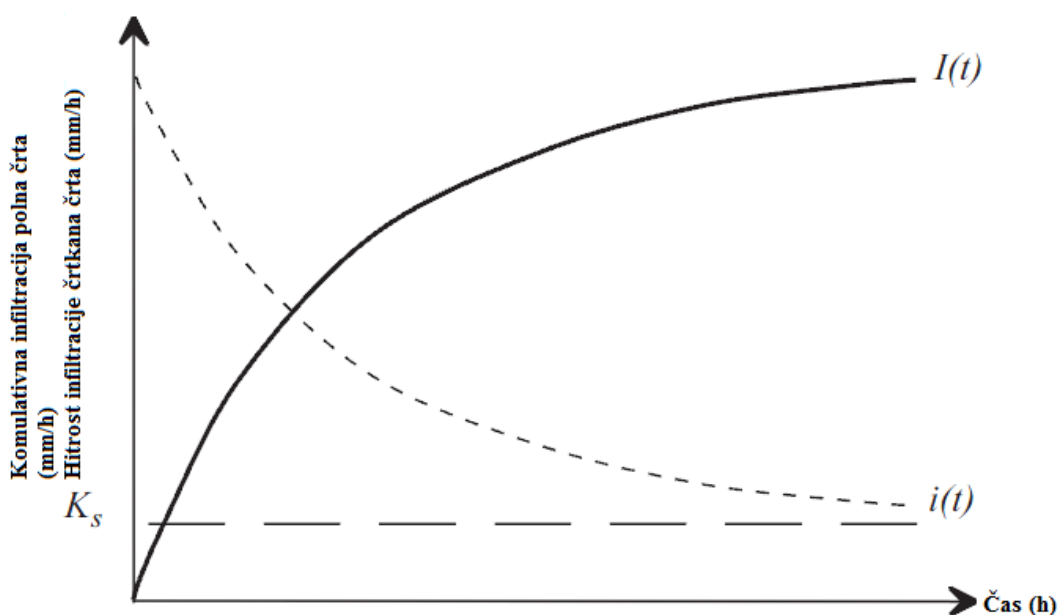
Živali in rastline pa lahko spreminjajo fizikalne lastnosti tal tudi z vodoodbojnimi preplastitvami površine in z ustvarjanjem makropor. Nezasičena hidravlična prevodnost je odvisna od vodoodbojnosti (Poglavje 3). Po drugi strani pa hitrost infiltracije povečujejo ustvarjene makropore (Lichner in sod., 2007).

### 2.3.4.4 Naklon

Relief površja s svojim naklonom in orientacijo spreminja površinski odtok. Padavinska voda lahko ob večjem naklonu odteče, še preden se infiltracijski proces začne (Lili, 2008).

### 2.3.4.5 Čas

Pomemben parameter je tudi čas, saj se tla med samim procesom infiltracije spreminjajo. Vsi procesi v tleh se s časom razvijajo in spreminjajo (Slika 12). Tudi tok vode skozi tla se spreminja s časom (Lili in sod., 2008). Delci zemljine lahko nabrekajo ali se krčijo, s premikanjem vode pa se tudi premikajo (Oosterbaan in Nijland, 1994).



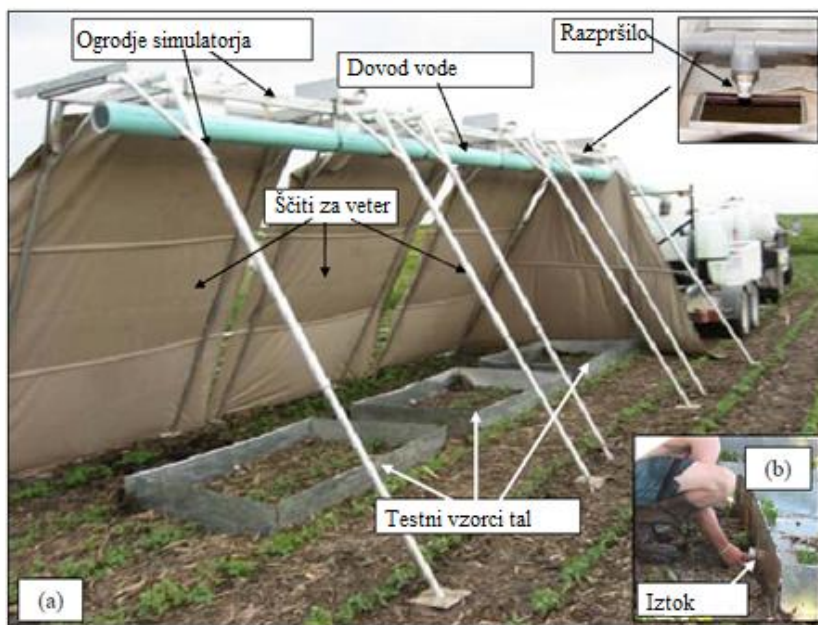
Slika 12: Evolucija hitrosti infiltracije in komulativne infiltracije skozi čas (Povzeto po Musy in Higy, 2004: str. 175)

## 2.4 Meritve infiltracije

Da bi teorijo infiltracije prenesli v realno okolje, moramo izvesti številne praktične meritve, saj nam lahko le te dajo dovolj natančne parametre infiltracije. Pomembna parametra sta predvsem koeficient hidravlične prevodnosti in poroznost (kapilarnosti) zemljine. Človekov vpliv in časovno spreminjanje strukture zemljine sta glavna vpliva na parametre, zato imajo prednost meritve »in situ«, ob minimalni deformaciji tal. Poznamo tri glavne pristope k izvedbi enostavnih, hitrih in natančnih meritev infiltracije: razpršilne, cilindrične in tlačne metode.

### 2.4.1 Razpršilni infiltrometri

Razpršilne infiltrometre so prvi razvili hidrologi in agronomski inženirji, ki so opazovali erozijo in površinski odtok vode (Slika 13). Namen te metode je simulirati naravni dežni pojav. Pri tem moramo skrbno oponašati velikost kapljic, ter padec in kinetično energijo padavin. Metoda je zato zahtevna, draga in porabi velike količine vode. Večina razpršilnih infiltrometrov meri razliko med količino škropljene vode in površinskim odtokom (Smith in sod., 2002).



Slika 13: Razpršilni infiltrometer (Povzeto po Chang, 2010: str. 29)

### 2.4.2 Cilindrični infiltrometri

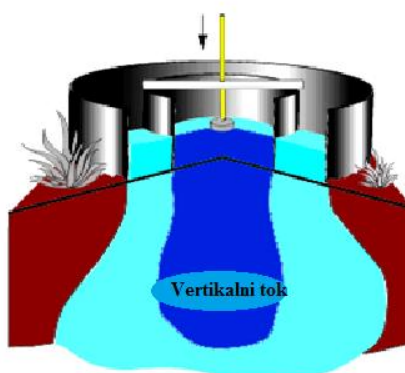
Meritve s cilindričnimi infiltrometri je v uporabi že dolgo časa in se uporablja najpogosteje. Razlog zato je enostavna uporaba in nizka cena terenskih meritev. Metoda temelji na vstavitvi obroča, oz. obročev v tla in meritvi infiltriranja vode v tla. Vodo so včasih dodajali ročno, danes pa uporabljamo Marriottovo posodo. Tako merimo infiltracijo v zasičenih tleh (Smith in sod., 2002). Poznamo infiltrometer z enojnim obročem in infiltrometer z dvojnim obročem.

### 2.4.2.1 Infiltrometer z enojnim obročem

Infiltrometer z enojnim obročem ima največkrat premer obroča 15 cm ali več in višino 20 cm. Obroč mora prenesti silo zabijanja v tla brez deformacij. Višina vode v obroču naj bi bila stalno 5 do 10 cm. Obroč mora biti iz trpežnega materiala, ki omogoča vstavitve obroča v tla z zabijanjem ali vtiskovanjem.

Za izračun moramo predpostaviti enodimenzionalni tok vode. Da bi dosegli bolj natančne rezultate, moramo zabiti obroč globlje v tla ali pa dodati drugi obroč. S tem zmanjšamo napako in dobimo večjo relevantnost podatkov.

### 2.4.2.2 Infiltrometer z dvojnim obročem (DRI)



Slika 14: Delovanje infiltrometra z dvojnim obročem (Povzeto po Lili in sod., 2008)



Slika 15: Primer infiltrometra z dvojnim obročem (Povzeto po Eijkelkamp, 2012)

Infiltrimeter z dvojnimi obroči, kot že samo ime pove, je sestavljen iz dveh obročev. Drugi obroč ustvari mejno območje (Slika 14, 15), ki še dodatno usmeri tok infiltrirane vode vertikalno navzdol (Chang, 2010).

Za izračun zasičene hidravlične prevodnosti so na voljo številne metode. Prva skupina teh metod je sestavljena iz kombinacije matematičnih in fizikalnih postopkov z aproksimacijami, ki opisujejo kumulativno infiltracijo v odvisnosti od časa (Fodor in sod., 2011).

DRI se lahko uporabi v razmerah s stalno ali s padajočo višino vodnega stolpca, rezultati pa so enaki (Reynolds in sod. 2002). Znanstveniki so razvili tudi avtomatski DRI, ki olajša merjenje (Arriaga in sod., 2010). Koeficient hidravlične prevodnosti lahko določimo po naslednji enačbi:

$$K_s = 1.5C_2. \quad (26)$$

Čeprav faktor lahko variira med 5 in 1.5 je najpogosteje izbrana vrednost 1.5 (Fodor in sod., 2010). Druga skupina metod, ki se uporabljajo za izračun koeficienta hidravlične prevodnosti, uporablja empirične enačbe. Kljub temu, da koeficienti nimajo fizikalnega pomena, so tudi te metode redno uporabljajo.

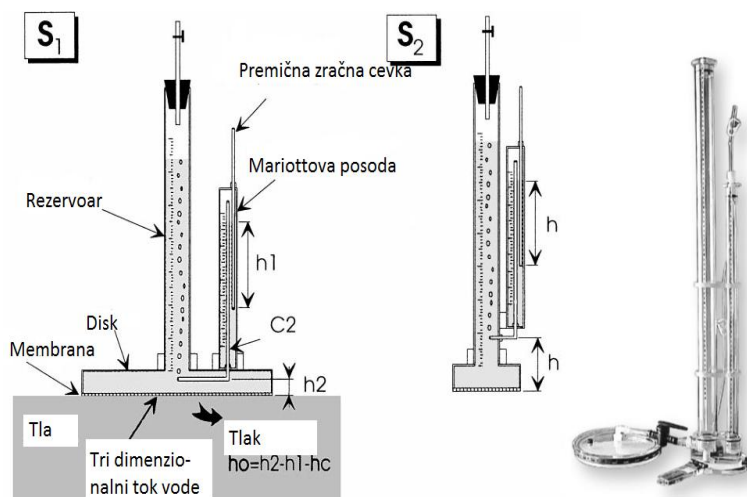
Znana je npr. Hortonova (1940) enačba:

$$I = at - \frac{b}{c}(1 - e^{-ct})K_s \approx a. \quad (27)$$

### 2.4.3 Tlačni infiltrometri

S tlačnimi infiltrometri merimo infiltracijo v suhih in nenasičenih tleh. Tlačni infiltrometri so narejeni za enostavne in hitre meritve hidravličnih lastnosti in strukturnih karakteristik na površju tal (Wang in sod., 1998). Tok vode iz tlačnega infiltrometra skozi najlonsko membrano v spodaj ležeča tla, je tri dimenzionalen (Slika 16). Opis gibanja temelji na Richardovi enačbi z začetnimi in robnimi pogoji. Ker ni analitične rešitve za tok vode v tla, se uporabljajo tudi pri tej metodi polempirični postopki reševanja.





Slika 16: Primer tlačnega infiltrometra, levo z označenimi sestavnimi deli (Povzeto po Angulo-Jaramillo in sod., 2000: str. 2)

Za meritev pod tlakom je ključnega pomena dober začetni stik med površino tal in virom vode (diskom). To največkrat dosežemo z nanosom tanke plasti peska. Takoj po namestitvi infiltrometra se odvečni pesek odstrani. Med merjenjem se odčitava količino infiltrirane vode iz rezervoarja (Angulo-Jaramillo in sod., 2000).

Tudi mini disk infiltrometer, uporabljen v tej nalogi, spada med tlačne infiltrometre (Decagon, 2012) in je opisan v poglavju 4.2.3.1.1.

### 3 TEORIJA VODOODBOJNOSTI

Vodoodbojnost je pojav odbijanja vode od površine. S kemijskega vidika vodoodbojne snovi niso polarne in tako ne privlačijo vode. V primeru tal pa voda stoji na površini vodoodbojnih tal, dokler ne izhlapi, odteče, ali pa če s časom vodni hlapi predrejo vodoodbojno prevleko in se vežejo na mineralne delce. Vendar enkrat omočena vodoodbojna tla infiltrirajo vodo skoraj tako dobro kot normalno omočljiva tla (DeBano, 1981).

Vodoodbojnost je relativen pojem, saj vedno obstaja neka privlačnost med tekočino in trdnimi delci in tla dejansko ne odbijajo vode. V naravi popolna hidrofobnost ne obstaja (Doerr in sod., 2000). Vodoodbojnost sta prva opisala Scieiner in Shorey leta 1910 (De Bano, 1981). Pojav je begal znanstvenike že pred 20. stoletjem, vendar nove študije še vedno odkrivajo nove povezave in lastnosti vodoodbojnosti tal. Hidrofobnost tal se raziskuje z različnimi terenskimi meritvami in laboratorijskimi preizkusi. Pomen poznavanja pojava pa je vse večji, saj z globalnim segrevanjem narašča število ekstremnih pojavov. Z razvojem ostalih znanosti pa se povečuje tudi razumevanje povezav procesov v naravi. Tudi število študij o pojavu vodoodbojnosti narašča (DeBano, 2000). Te pa odkrivajo pojavljanje vodoodbojnosti v vseh glavnih skupinah zemljin (Doerr in sod., 2006).

Vodoodbojnost tal zmanjšuje sposobnost sprejemanja vode v tla, oz. infiltracijo. Omočevanje tal lahko preprečuje za določen čas, ki lahko traja od nekaj sekund, ur do nekaj dni. S tem zmanjšuje infiltracijo, povečuje površinski odtok, kar povzroča večjo erozijo tal (Doerr et al., 2000).

Hidrofobnost je prisotna v številnih zemljinah, kot posledica sušenja tal, segrevanja ob požarih, mineralne sestave in organskih primesi. V zadnjih dveh desetletjih se je hidrofobnost različnih zemljin v različnih podnebnih intenzivno raziskovala. Vodoodbojnost tal je pomembna za rast rastlin, površinsko in talno hidrologijo ter erozijo tal (Doerr in sod., 2000).

#### 3.1 Nastanek vodoodbojnosti tal

Razlika med omočljivimi in vodoodbojnimi tlemi je v načinu sprejemanja in porazdelitve vode v tleh. Voda se na hidrofobni površini oblikuje v kroglice, ki lebdijo na površini, v primeru hidrofilne površine pa se razlije po površini in veže nanjo. Če je hidrofobna površina porozni medij kot sta pesek in grobozrnata prst, je učinek na infiltracijo večji. V velikih porah pa voda steče skozi, saj jo obod por odbija. Odbojnost in privlačnost med trdnimi delci in vodo izvira iz skupne privlačne sile (adhezije) in privlačnosti med molekulami vode (kohezije). Za razumevanje teh sil moramo upoštevati lastnosti vode (Doerr in sod., 2000).

Vodna molekula je sestavljena iz atoma kisika, ki je delno negativno nabit, in iz dveh atomov vodika s pozitivnim nabojem. Kot med vezmi kisika in vodika je  $104.5^\circ$ , kar daje molekuli bipolarno strukturo. Privlak negativno in pozitivno nabitih delov molekul vode privede do tvorbe vodikovih vezi. Voda se

na večino površin zaradi svoje bipolarnosti. Znotraj tekočine se sila privlaka izniči, ker so molekule obkrožene z drugimi molekulami. Na površini pa privlačna sila deluje navznoter in s tem teži k čim manjši površini vode, ki jo doseže v obliki krogle (sfere). Da bi se površina povečala, je nujno delo, oz. energija. Voda ima lastno površinsko napetost, in šele ko ima površina druge snovi večji privlak (površinsko napetost) od kohezijske sile vode, se voda razporedi po površini. Takšnim snovem pravimo da so hidrofilne. Vsi glavni materiali v tleh imajo veliko večjo prosto energijo od vode in so tako hidrofilni, medtem ko so organske snovi hidrofobne (Doerr in sod., 1998).

Kohezijo in adhezijo vode lahko jasno opazujemo skapilarnostjo vode v tleh. Kapilarni dvig  $z$  lahko izračunamo iz razmerja:

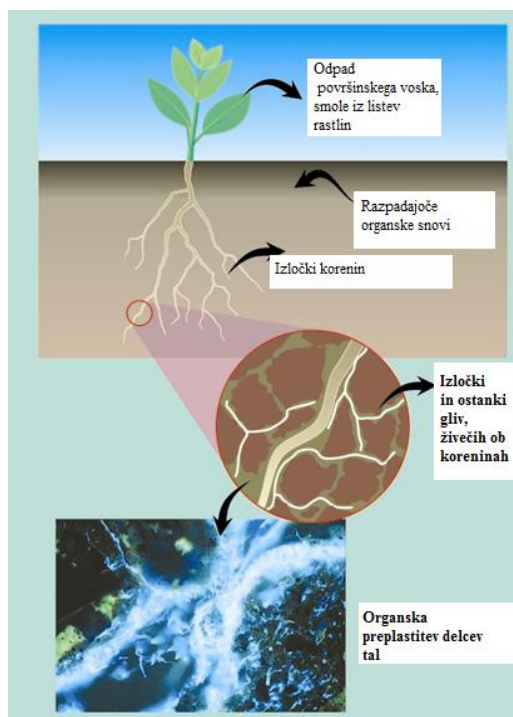
$$z = \frac{2y}{r} \quad (28)$$

Kjer je  $y$  površinska napetost in  $r$  porni radij. Manjše kot so pore, večji je kapilarni dvig. Ko se tla sušijo, se povečuje srk, saj se sušijo čedalje manjše pore. Ko rastline ovenijo (pri srku 1500 kPa), ostane na zrnih v tleh samo še tanka plast vode. V ekstremno odbojnih tleh je kapilarni dvig in srk 0. Kapljica vode bo prej izhlapela s površine, kot pa se infiltrirala v tla. Za takšna tla je značilni kot omočitve večji od  $90^\circ$ . Večina tal ima določeno stopnjo vodoodbojnosti in kot omočitve znaša med 0 in  $90^\circ$  (Hallett, 2007).

### 3.2 Viri vodoodbojnosti tal

Vodoodbojnost tal se pojavi zaradi akumulacije hidrofobnih rastlin in mikroorganizmov in njihovih odmrlih ostankov (organskih delcev). Kljub majhni količini teh hidrofobnih snovi, le-te prekrijejo talne delce in oblikujejo plasti hidrofobnih molekul z močnim učinkom (Doerr in sod., 2006). Najpogostejši biološki viri so ostanki rastlin, ki vsebujejo veliko voskov, smol in aromatičnih olj. Vodoodbojnost povezujemo tudi s prisotnostjo gliv in talnih organizmov, s katerimi je povezana tudi rast specifične vegetacije (Slika 17). Nekatere vrste gliv lahko povečajo ali zmanjšajo hidrofobnost. Veliko vrst gliv in alg izloča hidrofobne snovi kot so alkani, olefini itd. Močnejšo vodoodbojnost najdemo pod plastjo organskih ostankov' (Doerr in sod., 1998, cit. po Dolšak, 2006). Vendar prisotnost rastlin in živali ustvarja makropore, ki povečujejo hitrost infiltracije.

Pomemben nebiološki vir vodoodbojnosti je ogenj oz. požar. Temperatura gorenja določa ali se bo hidrofobnost povečala ali ne. Običajno ogenj spremeni vodoodbojnost tlam do globine vpliva temperature in globine hidrofobne oz. organske snovi. Prvotno stanje se vzpostavi po nekaj mesecih oziroma letih, odvisno od intenzitete in vpliva visokih temperatur, tipov organskih sestavin, klime in tipov tal (DeBano, 1999, povzeto po Doerr in sod., 1998). Vodoodbojnosti tal po požaru so raziskovali številni raziskovalci (DeBano, 1979; Robichaud in sod., 2008; Glenn in Finley, 2009).



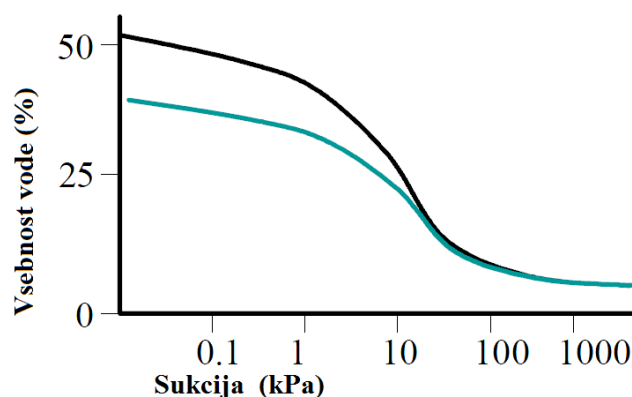
Slika 17: Prikaz izločanja hidrofobnih snovi rastlin in gliv (Povzeto po Hallett, 2007)

Vodoodbojnost je odvisna tudi od teksture tal in vsebnosti glina. Glina zmanjšuje vodoodbojnost, ker ima večjo površino na enoto volumna in jo hidrofobna snov težje prekrije. Nasprotno so tla z grobo teksturo bolj hidrofobna (Doerr in sod., 1998).

Količina vode v tleh pomembno vpliva na hidrofobnost. Voda spira organske delce globlje v tla in s tem zmanjšuje hidrofobnost tal. V izsušenih tleh se polarni deli vodnih molekul pritrdijo na mineralno površino tal, nepolarni del pa gleda ven in povečujejo vodoodbojnost. Tako je vodoodbojnost sezonski pojav in je močnejše izražena v sušnih obdobjih (Doerr in sod., 1998). Praviloma so višje ležeče deli tal bolj vodoodbojni kot globlje plasti. Vodoodbojnost v tleh je zaradi prej naštetih virov zelo neenakomerno prostorsko porazdeljena (DeBano, 1981).

### 3.3 Učinek vodoodbojnosti na infiltracijo

Zaradi hidrofobnosti tal je lahko gibanje vode močno omejeno. Tudi nekateri testi vodoodbojnosti temeljijo na primerjavi hitrosti infiltracije. Ker nobena zemljina ni popolnoma hidrofobna, se stopnja vodoodbojnosti spreminja počasi in začne po določenem času ter količini vode padati. Tako postanejo tla omočljiva in infiltrirajo vodo. Tla niso nikoli homogena, zato je infiltracija prostorsko zelo spremenljiva. Po daljšem obdobju pa pojav nima večjega učinka. Ključno je tudi mesto hidrofobnosti, saj ima vodoodbojna plast na površju večji učinek, kot globlje. Vodoodbojnost vpliva tudi na izhlapevanje vode iz zemljine in jo zmanjšuje (DeBano, 1981).



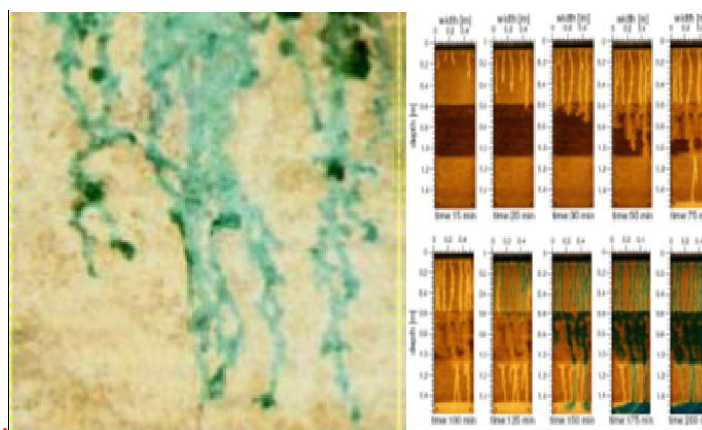
Slika 18: Padec retenzijske krivulje tal zaradi vpliva vodoodbojnosti (Povzeto po Hallett, 2007)

Iz Slika 18 je razvidno zmanjšanje sposobnosti retenzije tal oziroma zmanjšanje vsebnost vode zaradi vodoodbojnosti (Hallett, 2007).

Posledica neenakomerno razporejenih lastnosti in strukture prsti lahko povzroči nestabilno vlažilno fronto, ki zbira oz. usmeri vodni tok v ozke kanale. Tak tok imenujemo tudi preferični ali prstasti tok (angl. *Finger flow*) (Slika 19) (Wang in sod., 1999; Dolšak, 2006). Ti kanali vodnega toka zaobidejo večino volumna tal. S hitro odvodnjo predstavljajo tveganje neučinkovitega gnojenja, namakanja in uporabo kemikalij v kmetijstvu, saj voda prehitro odteče mimo koreninske plasti.

Vertikalna infiltracija v območju prstastega toka je približno trikrat hitrejša in s tem ni izgubljena samo voda, ampak tudi vse snovi v njej, kot so na primer kmetijska gnojila (Poulter, 2006).

Druga skrajnost pa so suhe, odbojne zaplate, na površju dobro vidne, saj so svetlejše od okolice in na njih ni bujne vegetacije. Posebnost teh zaplat je večja začetna vodoodbojnost tal glede na okolico (Wallies, 1991). To povzroča velik problem tudi na golf igriščih, ki namenjajo precej denarja za raziskave in odpravo takih zaplat (York in Baldwin, 1992).



Slika 19: Prstasti tok (angl. *finger flow*) in njegov razvoj (Thuller in Or, 2008)

### 3.4 Merjenje vodoodbojnosti

Vodoodbojnost se meri na terenu ali v laboratoriju. Najpogostejši metodi za določanje vodoodbojnosti tal sta: test časa vpijanja vodne kapljice v tla (angl. *Water Drop Penetration Time* ali WDPT), , in MED test (angl. *Molarity of an Ethanol Droplet*), pri katerem se meri površinska tenzija tal. Metodi medsebojno nista primerljivi zaradi narave metod merjenja (Dekker in sod., 1998).

Najenostavnejši test je WDPT test. Pri tem testu kapnemo kapljico vode na tla in merimo čas, ki je potreben za infiltracijo (DeBano, 1981).

Dokaj novo meritev vodoodbojnosti, z MDI, so razvili za hitre terenske meritve na pogorelih tleh v letu 2008 (Robichaud in sod., 2008). Metoda je bila razvita z namenom pridobiti več podatkov hitreje, enostavneje in z manj subjektivnosti. S terenskimi meritvami in primerjavo z WDPT so tako definirali novo metodo merjenja.

Meritve z MDI so delno primerljive z WDPT, saj rezultate obeh umeščamo v podobne razrede. A vendar je razpršenost in nenatančnost rezultatov pri MDI testu vodoodbojnosti večja (Edbrooke in Lavkulich, 2009).

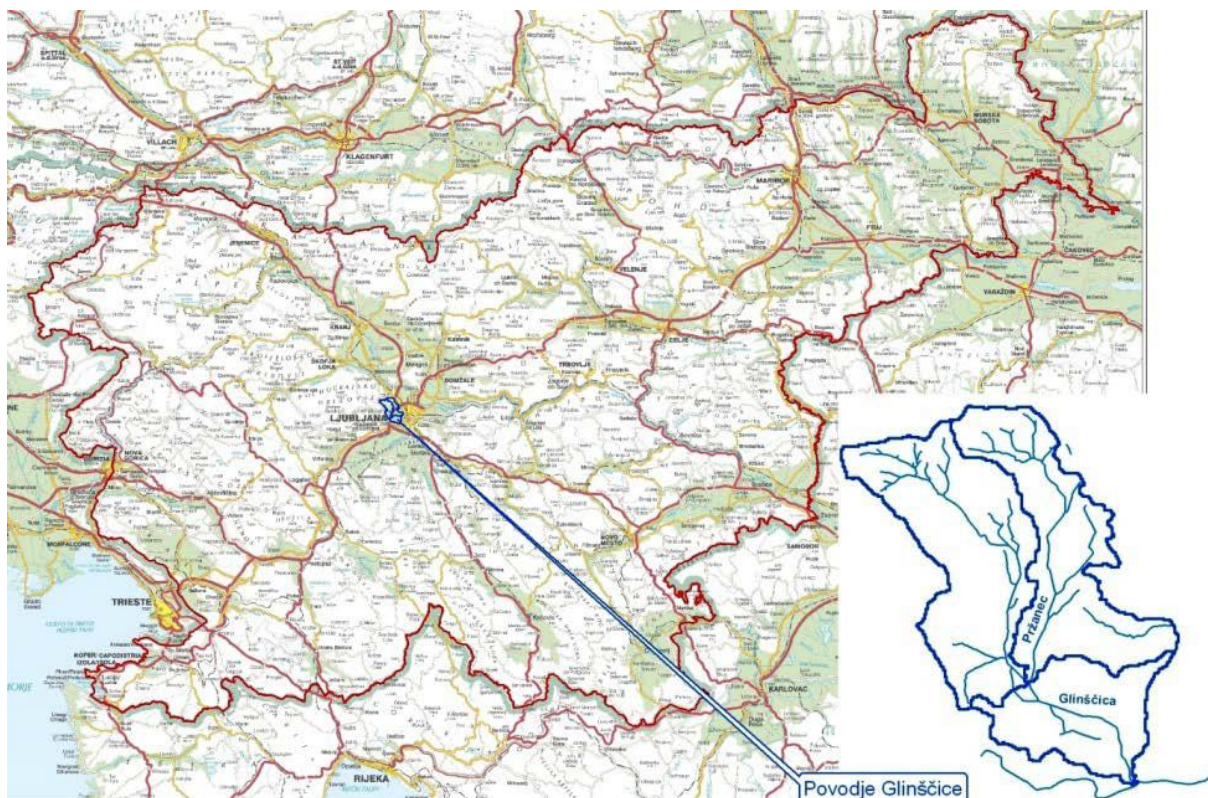
### 3.5 Preprečevanje vodoodbojnosti

Poznamo fizične, kemične in biološke pristope zmanjševanja vodoodbojnosti. V Avstraliji, kjer imajo še posebne velike probleme, so preizkusili več različnih metod. Biološka rešitev je povečanje populacij bakterij, ki razkrajajo hidrofobne organske snovi. Fizično frezanje in oranje zemljine spreminja strukturo tal in tako zmanjša vodoodbojnost na površini. Možno je tudi dodajanje gline, ki poveča specifično površino tal (Doerr, 2006; Poulter, 2006). Kemično lahko zmanjšamo vodoodbojnost z dodajanjem kemijskih spojin, ki povečujejo omočitev. V preteklosti so se uporabljale milne in detergentne mešanice. Začetno anionsko (negativno) nabiti reagenti, ki pa so imeli stranske učinke onesnaževanja in spreminjanje strukture tal. Novejši proizvodi so ne-ionske kemikalije, ki vsebujejo različne alkohole, estre in etre (York in Baldwin, 1992). Vodoodbojnost se zmanjšuje tudi z dodajanjem fungicidov, ki preprečujejo razvoj gliv. Glive namreč izločajo številne vodoodbojne snovi in voske (Štrukelj, 2010). Pri tem pa se pojavi problem odtoka teh snovi v podtalnico (Karnok in Tucker, 2002).

## 4 METODE DELA IN MERITVE

### 4.1 Opis eksperimentalnega porečja

Eksperimentalno območje porečja Glinščice je eno izmed treh eksperimentalnih porečij v Sloveniji poleg Reke in Dragonje (Šraj in sod., 2008). Eksperimentalna porečja so osnova razvoja hidrologije. Opremljena so s sodobno opremo za merjenje in so pomembna osnova za potrebe bazičnih in aplikativnih raziskav ter terenskih vaj študentov diplomskih in podiplomskih študijev (Brilly in sod., 2005). Najpogosteje so to manjša, zaključena območja s homogenimi lastnostmi (Šraj in sod., 2008).

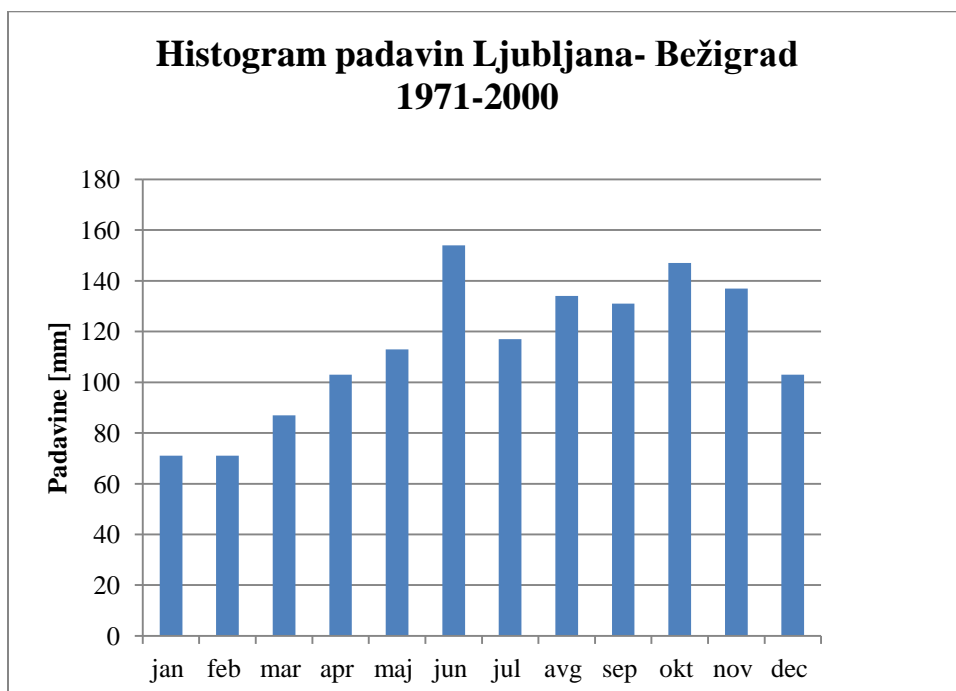


Slika 20: Položaj raziskovalnega območja (Pestotnik, 2011)

Porečje Glinščice leži v osrednji Sloveniji, in sicer SZ od Ljubljane (Slika 20). Glinščica tako teče po strmih pobočjih na vzhodu in zahodu, kot tudi po ravninskem območju v južnem delu porečja. Porečje Glinščice omejujejo pobočja Toškega čela in Črnega vrha na severu, kjer reka tudi izvira, urbano območje Ljubljane na vzhodu, urbano območje prek Brda do Tičnice na zahodu ter Gradaščice na jugu, v katero se Glinščica izliva. Večji pritok je Pržanec, katerega povirje sega v pobočje Velike trate in Male trate, ter odvaja predvsem vodo iz ravninskega dela vzhodno od Glinščice. Padavinsko območje Glinščice obsega 17,4 kvadratnih kilometrov. Na samo porečje pa se steka tudi del meteornih vod (Rusjan, 2003).

#### 4.1.1 Padavine in podnebje

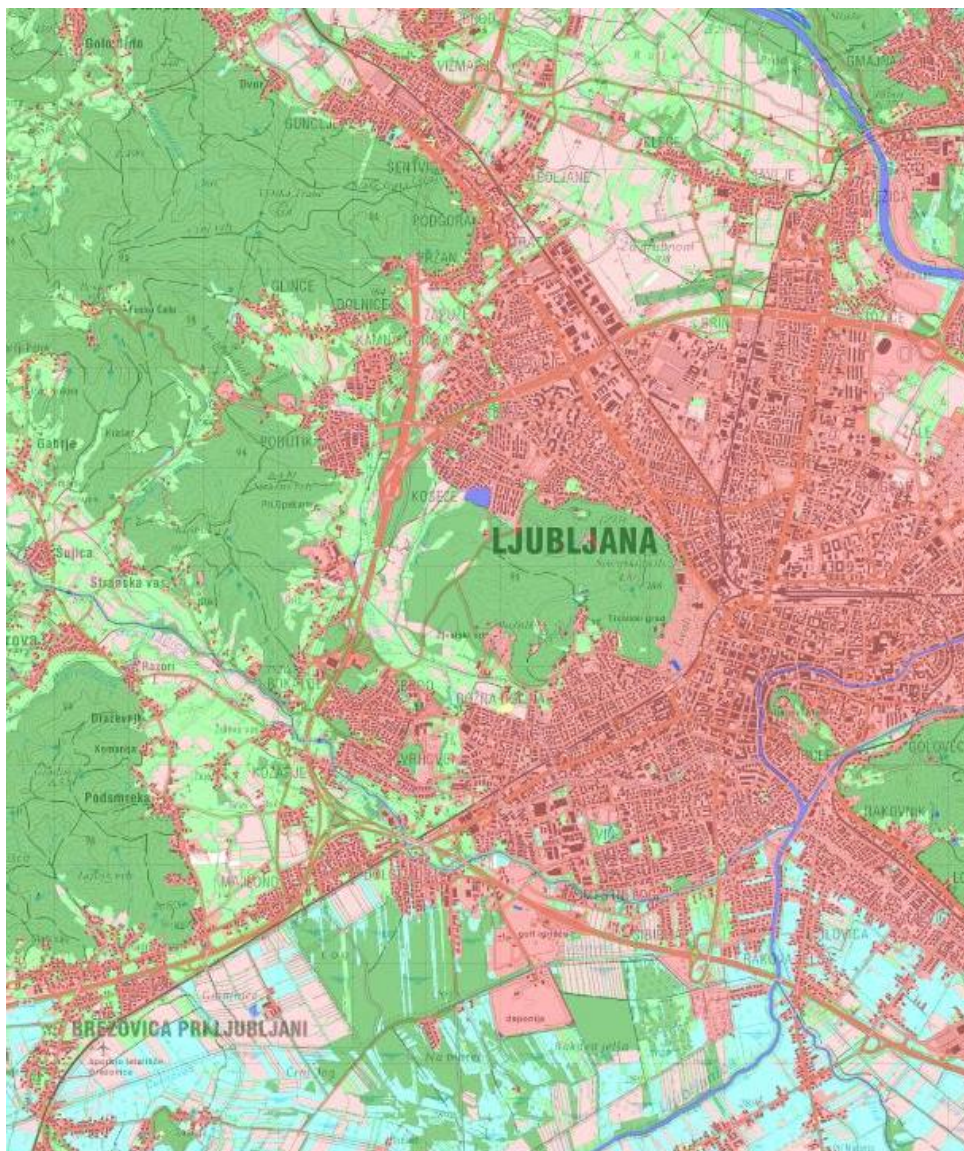
Območje ima prehodno podnebje iz gorskega podnebja Julijskih Alp v milejše podnebje Ljubljanske kotline. Najbližja padavinska postaja Agencije RS za okolje se nahaja 2 km vzhodno, in sicer postaja Ljubljana – Bežigrad (Štajdohar, 2005). Za Ljubljano je značilen celinski padavinski režim. Povprečna letna količina padavin za obdobje 1981-2011 znaša 1350.7 mm, histogram za 30-letno povprečje je prikazan na sliki Slika 21 (ARSO, 2012).



Slika 21: Histogram padavin Ljubljana-Bežigrad 1971-2000 z letnim povprečjem 1368mm(vir podatkov ARSO, 2012) Pokrovnost in raba tal

Pokrovnost in raba tal pomembno vplivata na infiltracijo in vodoodbojnost tal. Relief porečja Glinščice je precej raznolik, od strmih povirnih območij do ravníc. Na ravninskih delih prevladujejo kmetijske površine in travniki (Rusjan, 2003). Na pobočjih in ob vodotokih pa se pojavlja gozd (Slika 22).





Slika 22: Raba tal obravnavanega območja (vir podlage: Geopedia, 2012)

#### 4.1.2 Geologija in pedologija

Vrsto zemljine smo določili s pomočjo pedoloških kart, objavljenih na spletnih straneh geopedije (Geopedia, 2012) in atlasa okolja (Atlas okolja, 2012), ter z ekstrapolacijo podatkov iz pedogeografske karte Polhograjskega hribovja (Repe, 2006). Pedografska karta zajema del zgornjega porečja Glinščice in povzema pedogenetske dejavnike, ki so značilni za določen tip prsti. Avtor (Repe, 2006) je kot najpomembnejše navedel sledeče: matična podlaga, naklon pobočja, vodne značilnosti in nadmorsko višino.

Kot dodatna dejavnika pa Repe (2006) navaja še gozdno združbo in rabo tal. Avtor je pedogeografsko karto zasnoval na genetskem pristopu. Predpostavil je nastanek in razvoj prsti ter njihovo razporeditev v pokrajini in lastnosti kot posledico delovanja pedogenetskih dejavnikov. To so okoljski dejavniki oz.

geografskega okolja, pokrajine in delujejo na preučevan podsistem, to je prst (Repe, 2006). V obliki matematične odvisnosti jih zapišemo:

$$S = f (cl, o, r, p, t), \quad (29)$$

kjer je prst (angl. *Soil*) funkcija pedogenetskih dejavnikov: podnebja (angl. *Climate*), živega sveta (angl. *Organism*), reliefa (angl. *Relief*), matične podlage (angl. *Parent material*) in časa (angl. *Time*).

"Za slovenske razmere pa tako nabor kakor tudi razporeditev dejavnikov ni ustrezna oziroma je premalo podrobna. Stritar (1991) je enačbo priredil za slovenske razmere in jo poznamo kot Stritarjevo formulo" (Prus, 2000, cit. po Repe, 2006).

$$T = f (G, V, R, K, O, Č) t . \quad (30)$$

Razvoj in lastnosti tal so odvisne od geološke osnove (matične podlage), reliefa, klime, vodnih razmer, organizmov, človeka in časa. Vsaka prst, njene lastnosti in procesi, ki potekajo v njej, so rezultat vzajemnega delovanja vseh teh dejavnikov, čeprav pogosto lokalno en dejavnik prevlada nad ostalimi, vpliv nekaterih pa je komaj čutiti (Repe, 2006).

'Pedogeografsko karta je razdeljena na več nivojev, ki se med seboj razlikujejo po podrobnostih, s katerimi so predstavljeni pedogenetski dejavniki' (Repe, 2006). Za naše delo in meritve smo se osredotočili na tretji in četrti nivo. Na porečju Glinščice tako najdemo štiri pedogeografske enote.

Prvo pedogeografsko enoto predstavlja skupina prsti, ki so nastale v dnu dolin, na peščenih aluvialnih nanosih, na nizkih nadmorskih višinah od 300 do 400 metrov, na majhnih strmcih 8° in jih naravno poraščajo vlagoljubno rastlinstvo vrb, jelš, topolov in jesenov. Za to enoto so značilne kmetijske površine in travniki (Repe, 2006). Po FAO WRB mednarodni klasifikaciji prsti ta enota ustreza evtričnim in distričnim fluvisolom.

Drogo pedogeografsko enoto predstavlja skupina prsti, ki so nastale v dnu dolin, na prehodu v pobočja, na koluvialnih peščenih nanosih do 10° in jih poraščajo bukovi gozdovi. Za to enoto je značilno ozelenjevanje njivskih in zaraščanje travniških površin (Repe, 2006). Ustreza evtričnim in distričnim planosolom.

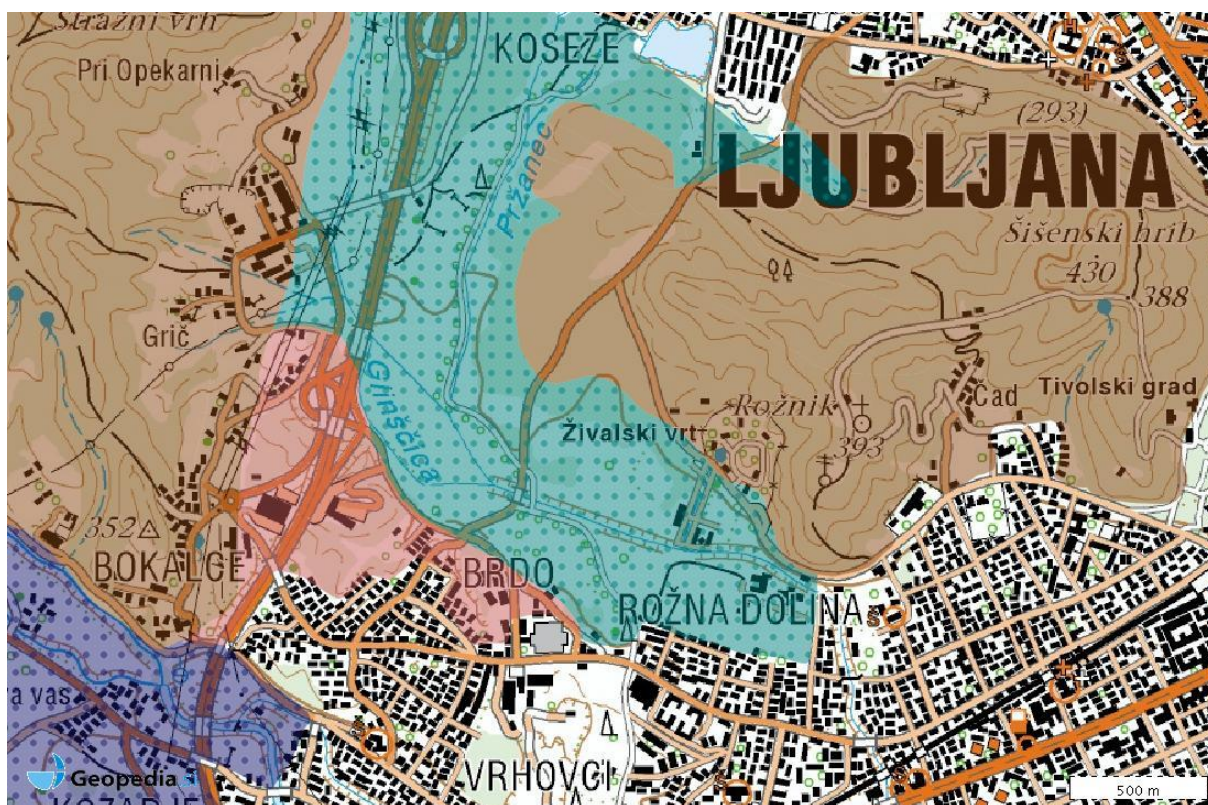
Tretja pedogeografska enota predstavlja skupino prsti, ki so nastale na dnu dolin, na slabo prepustnih glinastih nanosih, na nizkih nadmorskih višinah od 250 do 350 metrov z neznatnih strmcih 3° in jih poraščajo vlagoljubne združbe vrb, jelš ter kisloljubni borovi gozdovi. Za to enoto je značilna raba tal gozd (Repe, 2006). Po FAO WRB mednarodni klasifikaciji prsti ustreza skupini distričnih glejsolov.

Četrta pedogeografska enota predstavlja skupino prsti, ki so značilne za hribovja in so nastale na rdečih nekarbonatnih peščenjakih, v večjih nadmorskih višinah od 600 do 700 metrov, na naklonih

manjših od 25° in jih poraščajo acidofilni bukovi gozdovi. Za to enoto je značilna raba tal gozd. Ustreza distričnim kambisolom (Repe, 2006).

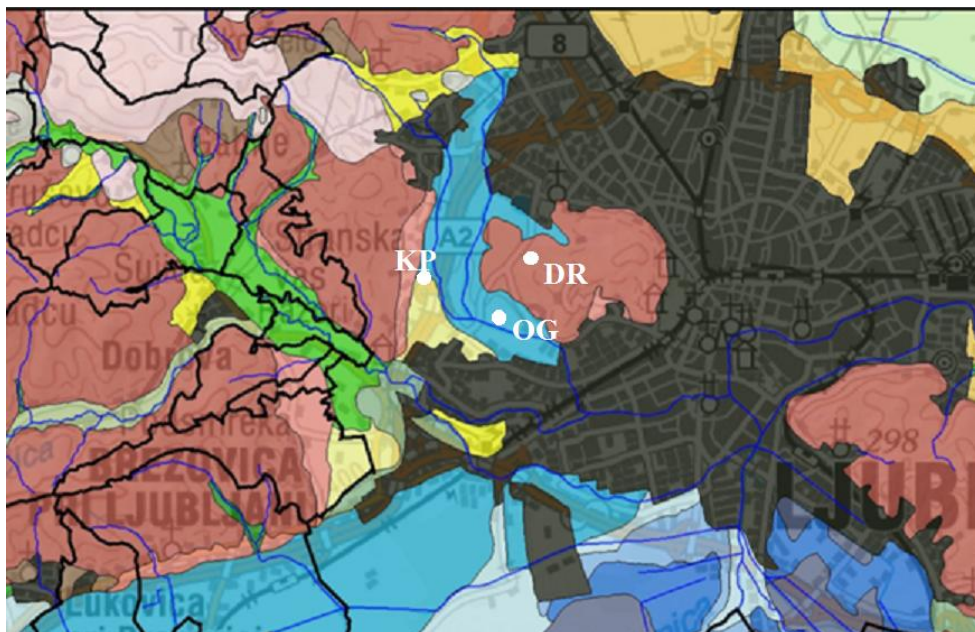
Glede na pedološko karto geopedije (Geopedia, 2012) izbrana merilna mesta (Slika 23) padejo v naslednje skupine prsti

- evtrični glejsoli (modro obarvani),
- distrični kambisoli (rjavo obarvani),
- distrični planosoli (rdeče obarvani).



Slika 23: Pedološka karta (Geopedia, 2012)

Podobne tipe prsti smo ugotovili tudi iz karte Atlasa okolja (Atlas okolja, 2012). Na karti (Slika 24) so lepo vidna rdeče obarvana distrično rjava tla, modro obarvani distrični in evtrični amfoglej in svetlo rumeno pobočni, ravninski distrični psevdoglej.



Slika 24: Pedološka karta z vrisanimi osmi vodotokov in označenimi merilnimi mesti (vir podlage: Atlas okolja, 2012)

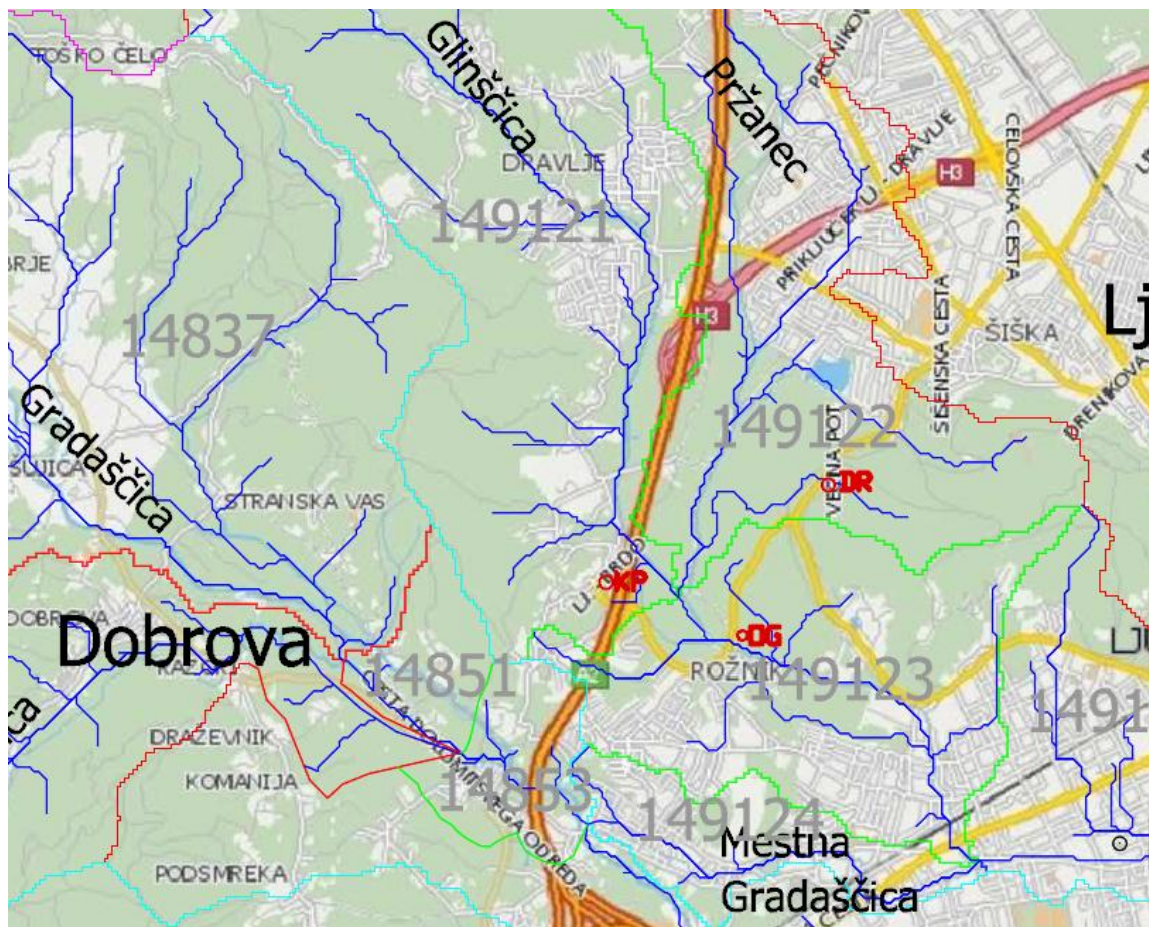
## 4.2 Meritve

### 4.2.1 Merilna mesta

Lokacije meritev so prikazane na karti (Slika 25) in v preglednici 2.

Preglednica 2: Koordinate lokacij meritev (Atlas okolja, 2012)

Lokacija meritve	Oznake	Koordinate
Distrično rjava tla	DR	46°03'41,00" ; 14°28'06,89"
Obrečno oglejna tla	OG	46°03'10,90" ; 14°27'44,75"
Koluvalno psevdoglejna tla	KP	46°03'37,91" ; 14°27'10,62"

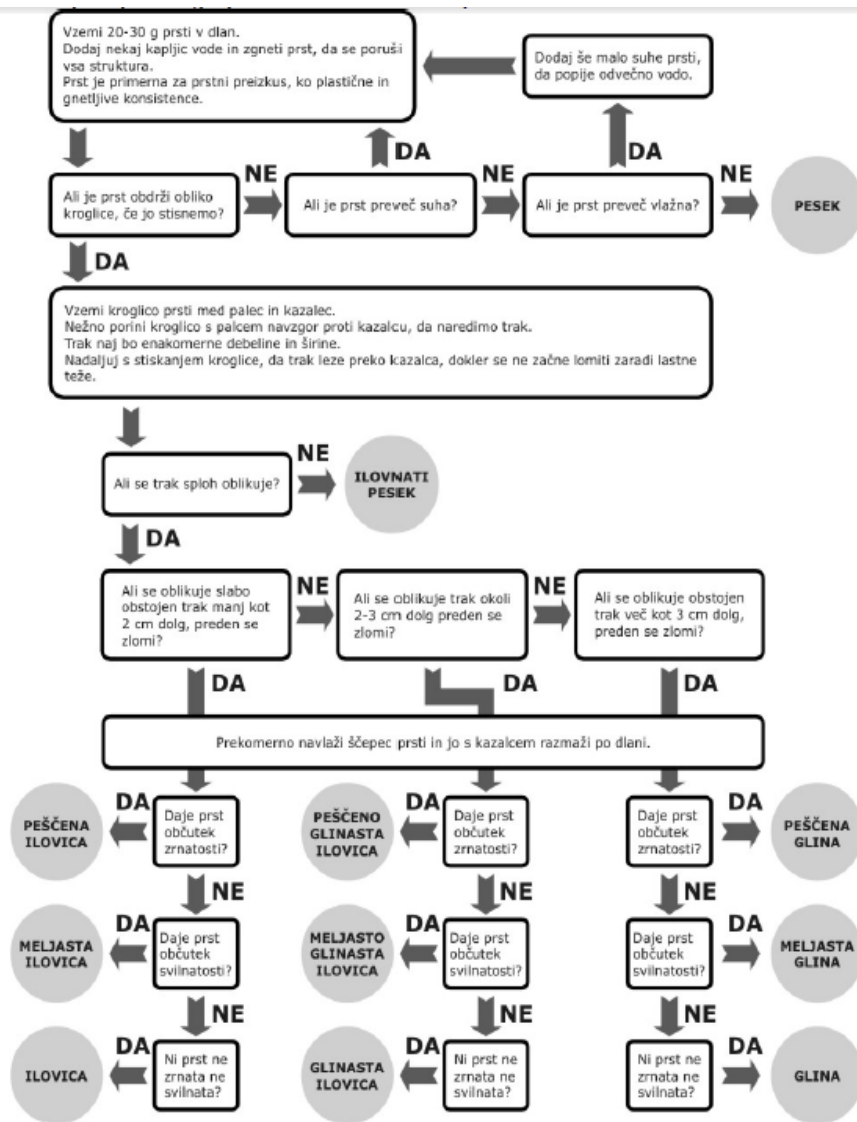


Slika 25: Lokacije meritev z označenimi tipi tal (vir podloge: Atlas okolja, 2012)

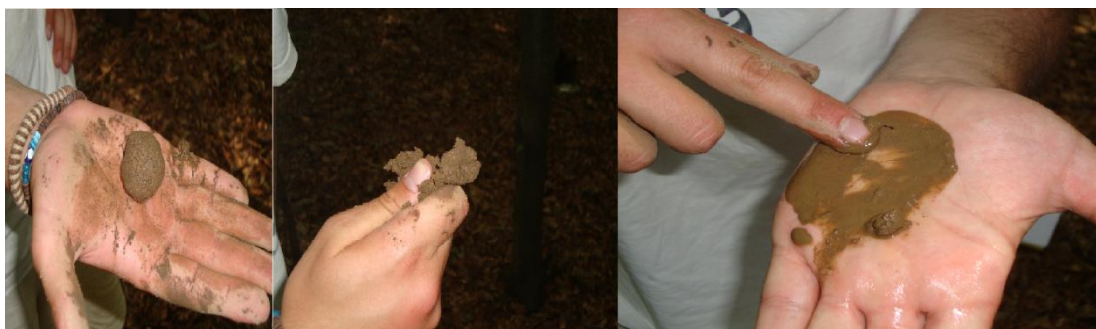
Meritve smo izvedli med 28.6. in 6.7.2012, med vročinskim valom z izredno visokimi temperaturami. Živo srebro je namreč doseglo tudi 38 °C. Meritve smo opravili v enem tednu in v tem času ni bilo padavin, ki bi lahko vplivale na meritve. Ker meritve v gozdu niso dale dovolj uporabnih rezultatov, smo izvedli dodatne meritve. Dodatne dnevne parametre podnebja se lahko pridobi na Agenciji za okolje in prostor Republike Slovenije.

#### 4.2.2 Prstni preizkus določanja teksture tal

Teksturni razred tal je ena izmed prvih stvari, ki jih določimo na kraju preizkusa in je povezan z staranjem in preoblikovanjem materiala. Teksturne razredi lahko na terenu dokaj natančno določimo z občutenjem in prepoznavanjem peščenih delcev in oceno deleža glinenih in meljastih delcev. Na terenu ni nobenega mehansko-analitičnega postopka, ki bi bil bolj natančen od prstnega preizkusa izkušenega raziskovalca. Oseba pa mora biti kljub temu poznati lokalne prsti. Napačni rezultati so lahko posledica določenih lastnosti prsti, če jih raziskovalec ne pozna. Glineni delci se lahko npr. sprimejo tako močno, da dajejo občutek zrnivosti. Vzorci prsti se zato preverijo tudi v laboratoriju. Postopek prstnega preizkusa za določanje teksture je prikazan na slikah 26 in 27:



Slika 26: Postopek prstnega preizkusa za določanje teksture (Repe, 2006: str. 256)



Slika 27: Primer prstnega preizkusa

Na vseh merilnih mestih smo pred meritvami infiltracije izvedli prstni preizkus teksture tal (Preglednica 3).

Preglednica 3: Prstni preizkus teksture tal

Tip tal	Kroglica	Trak	Občutek	Tekstura
Distrično rjava travnik	da	več kot 2 cm	svilnat	meljasta glinasta ilovica
Distrično rjava gozd	da	pod 2 cm	svilnat	meljasta ilovica
Obrečno oglejna travnik	da	več kot 2 cm	svilnato zrnat	glinasta ilovica
Obrečno oglejna gozd	da	pod 2 cm	grobo zrnat	peščena ilovica
Koluvialni psevdoglej travnik	da	več kot 2cm	grobo zrnat	peščeno glinasta ilovica
Koluvilni psevdoglej gozd	da	pod 2 cm	svilnat	meljasta ilovica

### 4.2.3 Meritve infiltracije

Meritve infiltracije smo opravili dvema različnima infiltrometroma. Dvojni obroč je že opisan v poglavju 2.4.2, sam potek opravljanja meritve pa sledi v poglavju 4.2.3.3. Novejši infiltrometer, s katerim smo opravili meritve, je minidisk infiltrometer, katerega opis meritve sledi v poglavju 4.2.3.1.

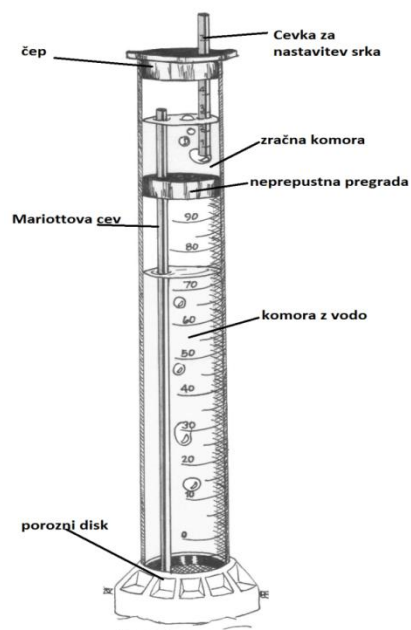
#### 4.2.3.1 Opis meritev infiltracije z MDI

Mini disk infiltrometer je uporaben predvsem v primerih, ko so tla močno poraščena, ali tam, kjer je teren težko dostopen. Omogoča nam hitro in natančno oceno hidravlične prevodnosti (Brilly in Šraj, 2005). Ena izmed pomembnejših prednosti je tudi nastavitev srka in s tem eliminacijo infiltracije v pore večje od določenega premera (Dohnal in sod., 2010).

Mini disk infiltrometer (MDI) je idealen za terenske meritve zaradi majhnosti, kompaktnosti in majhne porabe vode. Uporaben je tudi v laboratoriju in pri učenju osnov hidravlične prevodnosti.

##### 4.2.3.1.1 Sestavni deli MDI

Mini disk infiltrometer je sestavljen iz podolgovate cevke, ločene na dve komori. V spodnji komori je voda namenjena meritvi infiltracije, katere hitrost iztekanja nadzoruje zgornja, t.i. zračna komora (Slika 28). Na steni spodnje komore je merilni trak volumna vode v ml. Zračna komora nadzoruje podtlak, oz. srk, ki ga nastavimo s pomočjo premične cevke z oznakami podtlaka v [cm] (od 1 do 7). Na spodnji strani infiltrometra je porozni disk, iz nerjavečega materiala, ki preprečuje uhajanje vode. Marriottova cevka zagotavlja konstantni dotok vode iz zaprtega rezervoarja. V rezervoar vstopa zrak skozi sifon. Tlak na dnu sifona je vedno enak tlaku zunaj rezervoarja, oz. atmosferskemu. Če bi bil večji, zrak v sifon ne bi vstopil. Če je vtok v sifon na isti višini, bo vedno zagotavljal tok vode pri istem tlaku, ne glede na spremembo višine gladine vode v rezervoarju (Decagon Devices, 2012).



Slika 28: Sestavni deli mini disk infiltrometra (Decagon Devices, 2012)

#### 4.2.3.1.2 Delovanje MDI

Za pravilno delovanje moramo z vodo napolniti spodnjo in zgornjo komoro MDI. Hitrost iztekanja volumna vode iz spodnje komore določimo z nastavitvijo srka. Majhen premer diska omogoča nemotene meritve na relativno ravnih tleh. Ko disk postavimo na površino tal, začne voda iz spodnje komore iztekati. Merimo čas in odčitavamo gladine na skali spodnje komore. Z odčitki iztoka v ml skupaj z pripadajočimi časi in karakteristikami zemljine izračunamo hidravlično prevodnost (Decagon Devices, 2006).

#### 4.2.3.1.3 Primer izračuna količnika hidravlične prevodnosti

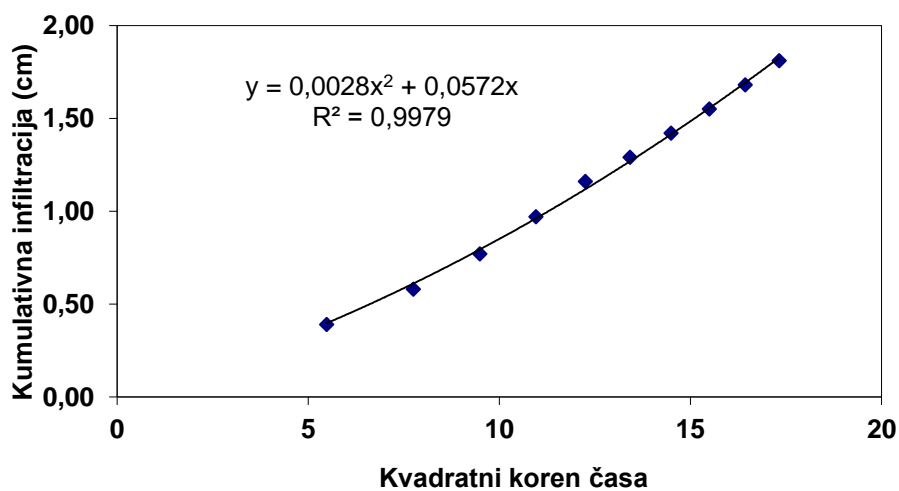
Izračun količnika hidravlične prevodnosti smo izvedli po navodil proizvajalca Decagon Devices. Izmerjene podatke smo uredili v Excelovi datoteki (Preglednica 4), zrisali graf in določili trendno črto (v obliki polinoma 2. stopnje) (Slika 29).

Izračun infiltracije oziroma količnika hidravlične prevodnosti temelji na že opisani metodi Zhanga, ki smo jo opisali v poglavju 2.3.3 (Decagon Devices, 2012).



Preglednica 4: Primer izračuna količnika hidravlične prevodnosti (Decagon Devices, 2012)

Čas [s]	Koren iz časa	Volumen [ml]	Infiltracija [cm]
0		95	0.00
30	5.48	89	0.39
60	7.75	86	0.58
90	9.49	83	0.77
120	10.95	80	0.97
150	12.25	77	1.16
180	13.42	75	1.29
210	14.49	73	1.42
240	15.49	71	1.55
270	16.43	69	1.68
300	17.32	67	1.81



Slika 29: Primer grafa kumulativne infiltracije v odvisnosti od kvadratnega korena časa (Decagon Devices, 2012)

Preglednica 5: Vrednosti van Genuchtenovih parametrov za 12 teksturnih razredov (Decagon Devices, 2012)

			<i>h<sub>o</sub></i> [cm]							
			-0.5	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7
Tekstura	<i>a</i>	<i>n</i>	<i>A</i>							
Pesek	0.145	2.68	2.84	2.40	1.73	1.24	0.89	0.64	0.46	0.33
Ilovnati pesek	0.124	2.28	2.99	2.79	2.43	2.12	1.84	1.61	1.40	1.22
Peščena ilovica	0.075	1.89	3.88	3.89	3.91	3.93	3.95	3.98	4.00	4.02
Ilovica	0.036	1.56	5.46	5.72	6.27	6.87	7.53	8.25	9.05	9.92
Melj	0.016	1.37	7.92	8.18	8.71	9.29	9.90	10.55	11.24	11.98
Meljasta ilovica	0.02	1.41	7.10	7.37	7.93	8.53	9.19	9.89	10.64	11.45
Peščeno glinasta ilovica	0.059	1.48	3.21	3.52	4.24	5.11	6.15	7.41	8.92	10.75
Glinasta ilovica	0.019	1.31	5.86	6.11	6.64	7.23	7.86	8.55	9.30	10.12
Meljasto glinasta ilovica	0.01	1.23	7.89	8.09	8.51	8.95	9.41	9.90	10.41	10.94
Peščeno glinasta ilovica	0.027	1.23	3.34	3.57	4.09	4.68	5.36	6.14	7.04	8.06
Meljasto glina	0.005	1.09	6.08	6.17	6.36	6.56	6.76	6.97	7.18	7.40
Glina	0.008	1.09	4.00	4.10	4.30	4.51	4.74	4.98	5.22	5.48

Vrednost parametra *A* za posamezen tip tal poiščemo v preglednici 5. Vrednost količnika hidravlične prevodnosti je vrednost v enačbi premice v grafu, ki je tipa XY raztreseni in je oblike:

$$y = ax^2 + bx, \quad (31)$$

kjer je  $a = C_1$ . V zgornjem primeru je  $a$  enak 0,0028 [cm/s],  $A$  pa ima vrednost 7.93. Tla so meljasta ilovica, srk vode pri meritvi je bil -2 [cm]. Ti podatki zadostujejo za izračun količnika hidravlične prevodnosti  $K$ , ki znaša  $3.53 \times 10^{-4}$  [cm/s] (Decagon Devices, 2012).

Občasno meritev z MDI da negativno vrednost naklona krivulje  $C_1$ . Negativna hidravlična prevodnost fizikalno ni mogoča, zato so te vrednosti napačne (Wang in sod., 1999; Jordan, 2010; Decagon Devices 2012). Takšne vrednosti so posledica plitke nepremočljive plasti zemljine ali premikanja infiltrometra med meritvijo. Boljše naleganje instrumenta smo dosegli z nanosom tanke plasti čiste mivke. Zaradi večjega števila negativnih vrednosti smo bili prisiljeni izvesti dodatne meritve v gozdu na vseh tipih tal.

Pri izračunih smo dodatno upoštevali tudi enačbo Dohnala, za tipe tal z vrednostjo  $n < 1.35$ , ki naj bi izboljšala natančnost rezultatov.

$$K = \frac{C_2(\alpha r_0)^{0.6}}{11.65(n^{0.82} - 1) \exp [34.65(n - 1.19)\alpha h_0]} \quad (25)$$

#### 4.2.3.3 Meritve infiltracije z DRI

Standardizirana naprava za merjenje infiltracije na terenu je infiltrometer z dvojnimi obroči (DRI) oz. dvema jeklenima valjema. Oba valja zabijemo v tla, vanju nalijemo vodo in opazujemo hitrost ponikanja vode. Zunanji val zmanjša disperzijo vodnega stolpca v zemljini (Brilly and Šraj, 2005).

Naprava uporablja Mariottovo posodo, s katero zagotavljamo stalni volumen vode. Stalni volumen vode izboljša natančnost meritve. Mariottova posoda nadalje zagotavlja stalno kontrolo pretoka in lažji izračun relativne napake. Vendar je uporaba Mariottove posode in infiltrometra z dvojnimi obroči relativno kompleksna meritev na terenu. Prav tako smo omejeni z meritvijo na ravnih tleh in deformacijo vzorca zemljine zaradi zabijanja (Lili, in sod., 2008).

Merimo količino iztočene vode iz Mariottove posode. Ob vsakem odčitku zapišemo čas in količino iztečene vode. Ko postane pretok iz notranjega valja konstanten, lahko določimo količnik hidravlične prevodnosti v zasičenih pogojih (Groen in sod., 2006).

##### 4.2.3.3.1 Potek meritve

Postopek pravilne izvedbe meritve je sledeč (Burt, 2009):

- Na izbranem mestu meritve smo najprej očistili merilno mesto. Nato smo namestili zunanji, večji obroč. Obroč premera 60 cm smo previdno zabili v tla, pri tem smo pazili da nismo deformirali obroča in tal. Nato smo zabili še manjši obroč v sredino večjega. Oba smo vtisnili vsaj 10 cm globoko.

- Okolico obročev smo previdno poteptali in s tem preprečili izlivanje vode. V bližino smo postavili Mariottovi posodi in ju priključili na obroča. Med obroča smo namestili PVC folijo, ki nam je omogočila nalivanje začetne količine vode brez porušitve strukture tal.
- V obroča smo nato zlili začetno količino vode in izmerili njeno globino z metrom. Nato smo hitro odstranili PVC folijo in začeli z meritvami.
- V določenih časovnih intervalih smo merili iztečeno količino vode iz Mariottovih posod in pazili, da je gladina vode v notranjem in zunanjem obroču na enaki višini. Višina vodnega stolpca mora biti v mejah med 5 in 20 cm (Burt, 2009). Po potrebi smo vodo dodajali. Časovne intervale smo postopoma povečevali.
- Ko je infiltracija postala konstantna, smo s preizkusom prenehali.

#### 4.2.3.3.2 Izračun

Iz pridobljenih meritev smo s pomočjo naslednje enačbe izračunali zasičeno hidravlično prevodnost.:

$$K_{fs} = \frac{q_s}{\left[ \left( \frac{H}{C_1 d + C_2 a} \right) + \left( \frac{1}{\alpha (C_1 d + C_2 a)} \right) \right]^{+1}}, \quad (32)$$

kjer je:

$K_{fs}$ ... količnik zasičene hidravlične konduktivnosti [cm/s],

$q_s$ ... končna konstantna hitrost infiltracije [cm/s],

$H$ ... je povprečna višina vodnega stolpca [cm],

$a$ ... radij notranjega obroča [cm],

$D$ ... globina vstavitve obroča [cm],

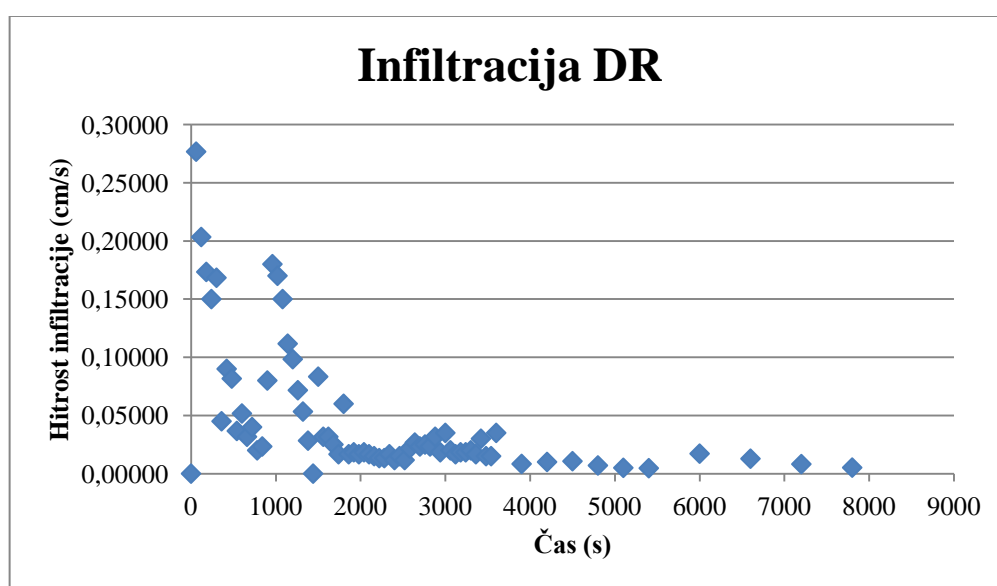
$C_1, C_2$ ... brezdimenzijski konstanti

$\alpha$ ... je mikroskopska dolžina pore [1/cm].

Izračun upošteva tudi nekatere predpostavke drugih raziskovalcev (Reynolds in sod., 2002; Bodhinayake in sod., 2004; po Arriaga in sod., 2010). Vrednosti  $C_1$  in  $C_2$  sta enaki  $0.316\pi$  in  $0.184\pi$ , saj smo med meritvijo zadostili pogoju  $d \geq 3\text{ cm}$  in  $H \geq 5\text{ cm}$ . Mikroskopsko dolžino pore  $a$  smo ovrednotili z  $0.12/\text{cm}$ . V preglednici 6 je podan primer izračuna, grafični prikaz rezultatov pa na sliki 30.

Preglednica 6: Prikaz podatkov pri merjenju z dvojnimi obroči

Čas [min]	Čas [s]	Višina vode [cm]	Hitrost infiltracije [cm/s]
0	0	259.3	0.00000
1	60	242.7	0.27667
2	120	230.5	0.20333
3	180	220.1	0.17333
4	240	211.1	0.15000
5	300	201	0.16833
6	360	198.3	0.04500



Slika 30: Grafični prikaz izmerjenih hitrosti infiltracije z DRI infiltrmetrom

Za končno, stalno hitrost infiltracije, smo privzeli povprečje zadnjih štirih vrednosti in po enačbi (33) izračunali količnik hidravlične prevodnosti:

$$K_{fs} = \frac{0.010833}{\left[ \left( \frac{15}{0.316 \cdot \pi + 0.184 \cdot 15} \right) + \left( \frac{1}{0.12(0.316 \cdot \pi + 0.184 \cdot 15)} \right) \right] + 1} = \frac{0.002192 \text{ cm}}{s} \quad (33)$$

$$= 78.92434 \text{ mm/h}$$

#### 4.2.4 Rezultati meritev infiltracije

##### 4.2.4.1 Distrično rjava tla

Lokacija meritev se nahaja v bližini Živalskega vrta v Ljubljani (Slika 32). Meritve smo naredili na dveh različnih rabah tal in sicer na travniku in v gozdu (Slika 31). Travnik je bil pokošen, kar je olajšalo meritve. Meritve so bile opravljene v senci in na soncu. Gozdne meritve so bile izvedene na vznožju

Rožnika. V gozdu prevladuje bukev in smreka, opazili pa smo tudi veliko kostanja in bora. Najprej smo morali odstraniti del površinskega humusa, da smo lahko postavili instrument na gola tla. Meritve so bile izvedene v blagem naklonu reliefa. Rezultati meritev z MDI so prikazani v preglednici 7.

Preglednica 7: Izračun  $K$  pri meritvah z MDI na distrično rjavih tleh

Travnik			Gozd		
$A=8.51$	$CI$	$K$ [cm/s]	$A=7.93$	$CI$	$K$ [cm/s]
1	0.01575	0.001851	1	-0.00021	negativen
2	0.01575	0.001851	2	-0.00021	negativen
3	0.00841	0.000988	3	-0.00027	negativen
4	0.00883	0.001038	4	0.00027	0.00003
5	0.00458	0.000538	5	-0.00024	negativen
6	0.00638	0.00075	6	-0.00005	negativen
7	0.000005	0.00000	7	0.00184	0.00023
8	0.01942	0.002282	8	-0.00037	negativna
9	0.00415	0.000488	9	0.00067	0.00011
10	0.00969	0.001139	10	-0.00012	negativna
			11	0.00405	0.00051
			12	-0.00026	negativna
			13	-0.00068	negativna
			14	0.00274	0.00035
			15	0.00156	0.00020
			16	0.00004	0.00001
			17	0.00028	0.00004
			18	-0.00023	negativna
			19	0.00727	0.00092
			20	0.00444	0.00056

## Travnik



## Gozd



Slika 31: Meritve z MDI na distrično rjavih tleh



Slika 32: Označena lokacija meritev na distrično rjavih tleh (prazen krog travnik, polni krog gozd)

Meritve DRI je bila izvedena samo na travniku, saj nam je preplet korenin onemogočal meritve v gozdu. Potrebno vodo za meritve smo vzeli iz Glinščice. Postavitev inštrumenta je razvidna iz slike 33, rezultati pa iz Preglednica 8 in slike 34.

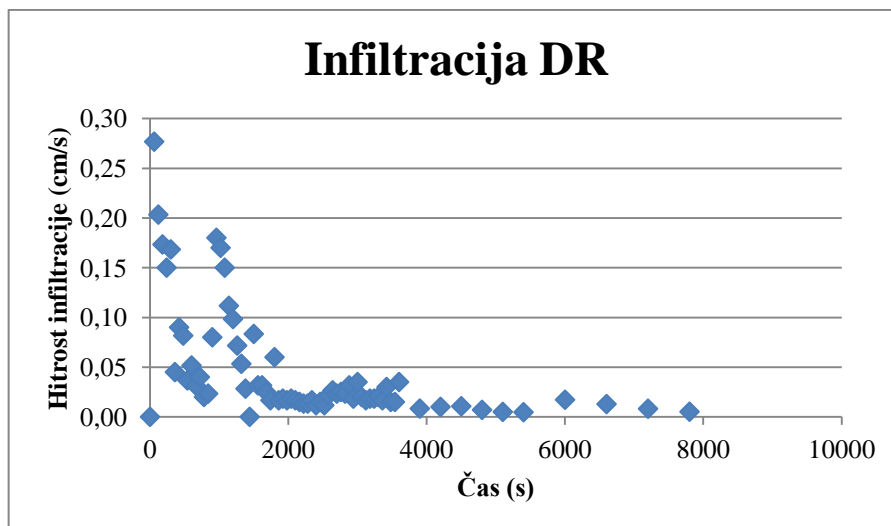


Slika 33: Postavitev DRI na distrično rjavih tleh

Preglednica 8: Izračun statistik in primerjave  $K$  pri meritvah z MDI na travniku in v gozdu ter  $K$  pri meritvi z DRI na distrično rjavih tleh.

Distrično rjava	$K$ [cm/s]		$K$ [mm/h]	
	Travnik	Gozd	Travnik	Gozd
K minimalno	0.00000	0.00001	0.0	0.2
K maksimalno	0.00228	0.00092	82.2	33.0
K povprečje	0.00109	0.00029	39.3	10.6
K standardna deviacija	0.00071	0.00029	/	/
K DRI	0.002192	/	78.9	/





Slika 34: Rezultat meritve infiltracije z dvojnimi obroči na distrično rjavih tleh

#### 4.2.4.2 Obrečno oglejna tla

Lokacija meritev se nahaja v bližini Glinščice in sicer tik ob mostu pešpota okoli Ljubljane. Relief je povsem raven, tla pa so bila zaradi suše razpokana. Razpokam smo se pri meritvi z MDI lahko ognili. Potrebne meritve v gozdu smo izvedli v bližnjem gozdičku. Gozd je mešan, prevladujejo: bukev, lipa, smreka, javor in hrast. Tudi tu smo pred meritvami odstranili del humusa, da smo lahko meritve izvedli na golih tleh (Slika 35). Meritve z DRI so vidne na sliki 37. Vse pridobljene statistike so zbrane v preglednici 10.

### Travnik



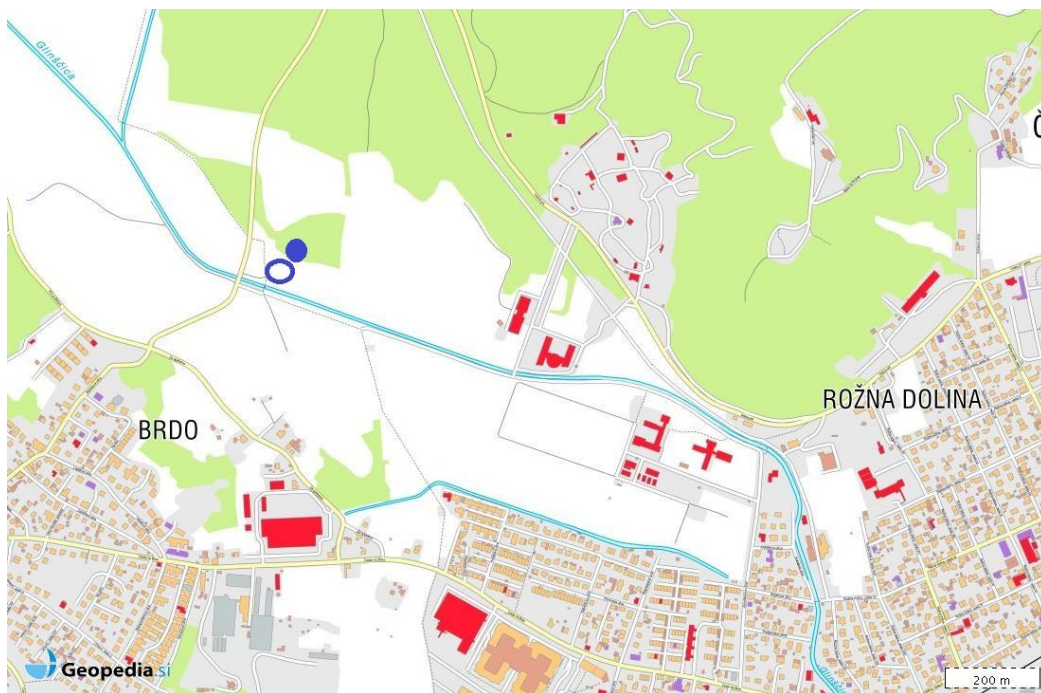
### Gozd



Slika 35: Meritve z MDI na obrečno oglejnih tleh

Preglednica 9: Izračun  $K$  pri meritvah z MDI na obrečno oglejnih tleh

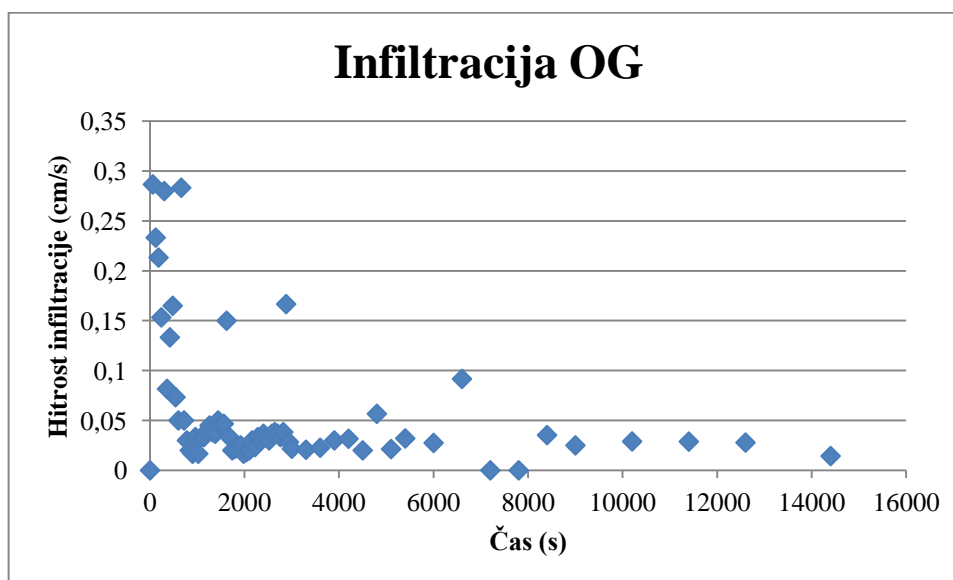
Travnik			Gozd		
$A=6.64$	$CI$	$K$ [cm/s]	$A=3.91$	$CI$	$K$ [cm/s]
1	0.00016	0.00002	1	-0.00004	negativen
2	0.00386	0.000581	2	0.00046	0.00012
3	0.00444	0.000669	3	-0.00053	negativen
4	0.00781	0.001176	4	-0.00006	negativen
5	0.00369	0.000556	5	-0.00022	negativen
6	0.00708	0.001066	6	-0.00059	negativen
7	0.00337	0.000508	7	-0.00042	negativen
8	0.00338	0.000509	8	-0.00004	negativen
9	0.00576	0.000867	9	-0.00025	negativen
10	0.00854	0.001286	10	-0.00018	negativen
			11	0.00079	0.00020
			12	-0.00081	negativen
			13	0.00023	0.00006
			14	-0.00064	negativen
			15	0.00003	0.00001
			16	0.00072	0.00018
			17	-0.00105	negativen
			18	-0.00016	negativen
			19	-0.00077	negativen
			20	-0.00043	negativen



Slika 36: Označena lokacija meritev na obrečno oglejnih tleh (prazen krog travnik, polni krog gozd)

Preglednica 10: Izračun statistik in primerjave  $K$  pri meritvah z MDI na travniku in v gozdu ter  $K$  pri meritvi z DRI na obrečno oglejnih tleh

Obrečno oglejna	$K$ [cm/s]		$K$ [mm/h]	
	Travnik	Gozd	Travnik	Gozd
$K$ minimalno	0.00002	0.00001	0.9	0.3
$K$ maksimalno	0.00129	0.00020	46.3	7.3
$K$ povprečje	0.00072	0.00011	26.1	4.1
$K$ standardna deviacija	0.00038	0.00008	/	
$K$ DRI	0.005059	/	182.1	/



Slika 37: Rezultat meritve infiltracije z dvojnimi obroči na obrečno oglejnih tleh

#### 4.2.4.3 Koluvalno psevdoglejna tla

Lokacija meritve se nahaja na zunanji strani ljubljanske obvoznice, tik pred naseljem Grič. Meritev na travniku smo izvedli poleg avtoceste, meritev v gozdu pa na pobočju hriba čez cesto v Grič. Tudi tu so bila tla na travniku zaradi suše razpokana (Slika 38). Gozd je pretežno listnat z bukvijo, javorjem in redkimi smrekami.

## Travnik



## Gozd



Slika 38: Meritve z MDI na koluvialnem psevdogleju

Preglednica 11: Izračun  $K$  pri meritvah z MDI na koluvialnih psevdoglejnih tleh.

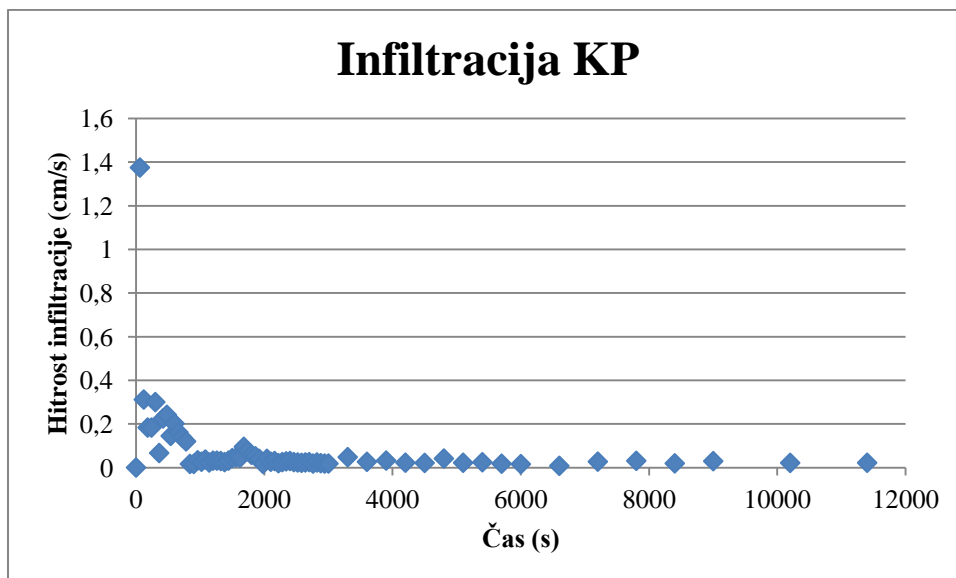
Travnik			Gozd		
$A=4.24$	$CI$	$K$ [cm/s]	$A=7.93$	$CI$	$K$ [cm/s]
1	0.00250	0.00059	1	-0.00093	negativen
2	-0.00026	negativen	2	0.00054	0.00007
3	-0.00025	negativen	3	-0.00022	negativen
4	-0.00006	negativen	4	0.00017	0.00002
5	0.00066	0.00016	5	0.00016	0.00002
6	0.00266	0.00063	6	-0.00042	negativen
7	0.00277	0.00065	7	-0.00043	negativen
8	0.00095	0.00022	8	-0.00047	negativen
9	0.00051	0.00012	9	-0.00036	negativen
10	0.00634	0.00150	10	-0.00037	negativen
			11	-0.00005	negativen
			12	0.00089	0.00011
			13	0.00021	0.00003
			14	0.0005	0.00006
			15	-0.00068	negativen
			16	0.00021	negativen
			17	-0.00003	negativen
			18	-0.00021	negativen
			19	-0.00093	negativen
			20	-0.0006	negativen



Slika 39: Lokacija meritev na koluvialnem psevdogleju (prazen krog travnik, polni krog gozd)

Preglednica 12: Izračun statistik in primerjave  $K$  pri meritvah z MDI na travniku in v gozdu ter  $K$  pri meritvi z DRI na koluvialnem psevdogleju

Koluvialni psevdoglej	$K$ [cm/s]		$K$ [mm/h]	
	Travnik	Gozd	Travnik	Gozd
K minimalno	0.00012	0.00002	4.3	0.7
K maksimalno	0.00150	0.00011	53.8	4.0
K povprečje	0.00055	0.00005	19.9	1.9
K standardna deviacija	0.00048	0.00004	/	
K DRI	0.004642	/	167.1	/



Slika 40: Rezultat meritve infiltracije z dvojnim obročem na koluvialnih psevdoglejnih tleh

#### 4.2.4.4 Rezultati po Dohnalu

Znanstvenik Dohnal je s sodelavci leta 2010 prišel do nove enačbe za tla z nizkim parametrom  $n$ . Njegova enačba je dosegljiva tudi na spletni strani proizvajalca. Tudi mi smo jo uporabili na glineni ilovici ter meljasto glineni ilovici in dobili rezultate v preglednici 13.

Preglednica 13: Rezultati meritev z MDI po Dohnalu

Oglejno obrečna			Distrično rjava		
Travnik			Travnik		
$A=16.34$	$CI$	$K$ [cm/s]	$A=20.4$	$CI$	$K$ [cm/s]
1	0.00016	0.00001	1	0.01575	0.00077
2	0.00386	0.00024	2	0.01575	0.00077
3	0.00444	0.00027	3	0.00841	0.00041
4	0.00781	0.00048	4	0.00883	0.00043
5	0.00369	0.00023	5	0.00458	0.00022
6	0.00708	0.00043	6	0.00638	0.00031
7	0.00337	0.00021	7	0.00001	0.00000
8	0.00338	0.00021	8	0.01942	0.00095
9	0.00576	0.00035	9	0.00415	0.00020
10	0.00854	0.00052	10	0.00969	0.00047
Povprečje [cm/s]		0.00029			0.00046
Povprečje [mm/h]		10.6			16.4

### 4.3 Meritve vodoodbojnosti

V okviru diplomske naloge smo izvedli meritve vodoodbojnosti z metodama WDPT in MDI. V nadaljnjih poglavjih sta obe metodi tudi opisani.

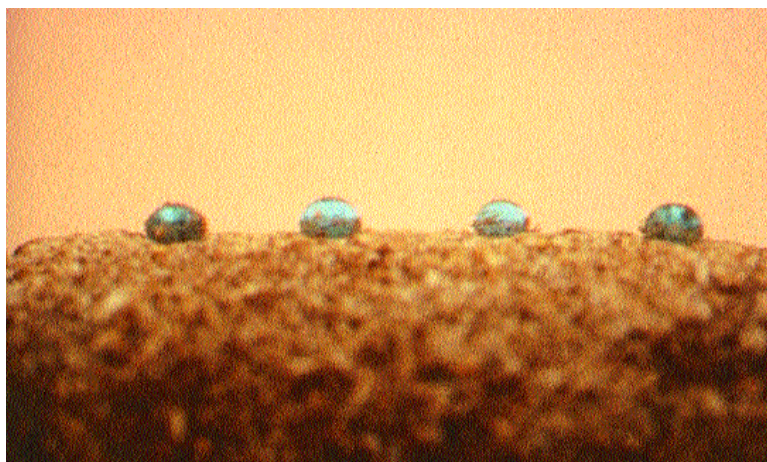
#### 4.3.1 Test časa vpijanja vodne kapljice v tla (WDPT test)

Pri metodi WDPT (angl. *Water Drop Penetration Time*) merimo čas vpijanje kapljice vode v tla. Na očiščeno površino tal se nakapa kapljice vode, nato pa se meri čas vpijanja. Glede na izmerjeni čas razdelimo tla v razrede vodoodbojnosti (Preglednica 14). Raziskovalci navajajo različen čas vpijanje kapljice v tla, ki je potreben za opredelitev določenih tal v razrede, zato tudi študije niso povsem primerljive. Tudi zaključek preizkusa je različen, saj nekateri merijo 6 ur spet drugi dlje (Dekker in sod., 1998).

Preglednica 14: Razredi vodoodbojnosti po Bisdomu in sodelavcih (1993) (cit. Po Doerr, 1998).

Razred	0	1	2	3	4	5	6
WDPT	<5 s	5-60 s	1-10 min	10-60 min	1-3 h	3-6 h	>6 h
	močljiva tla	zmerno vodoodbojna tla	močno vodoodbojna tla	zelo izrazito vodoodbojna tla	ekstremno vodoodbojna tla		

Pred pričetkom meritev tla previdno očistimo rastja in večjih organskih delcev. Nato na površino previdno nakapamo tri kapljice (približn 40 uml) destilirane vode in začnemo meriti čas. Paziti moramo, da kapljice ne kapnemo višje od 0.5 cm nad tlemi, saj bi drugače meritev zmotila kinetična energija padca kapljice (Doerr, 1998). Najkrajša meritev je 1 s. Pri nanosu kapljice smo pozorni, da kapljico ne kapnemo na večje agregatno zrno ali tujek v zemljini (Slika 41).



Slika 41: WDPT meritev na vodoodbojnih tleh (Karnok in Tucker, 2002)

### 4.3.2 Meritve vodoodbojnosti z MDI

MDI je instrument za meritev infiltracije, ki smo ga opisali že v poglavju 4.2.3.1.1. Ko se instrument s poroznim diskom nalega na površino tal, voda pronica skozi porozni disk v tla, zaradi prebite površinske napetosti vode. V primeru močno hidrofobnih tal pa ni dovolj velikega srka za prebitje površinske napetosti vode v poroznem disku in se voda v tla ne infiltrira. S terenskimi meritvami so določili optimalni srk za meritev vodoodbojnosti. En centimeter srka zagotavlja dovolj podtlaka, da voda ne teče neovirano iz MDI, a še vedno dovoljuje razlikovanje tal v razrede vodoodbojnosti (Preglednica 15). Z MDI merimo količino vode v ml, ki se infiltrira v eni minuti. Enominutni interval meritve zagotavlja prepoznavanje vodoodpornih tal in hkrati dovolj hitro terensko raziskavo (Robichaud in sod., 2008).

Preglednica 15: Razredi vodoodbojnosti pri meritvah z MDI (Robichaud in sod., 2008)

Razred vodoodbojnosti	0	1	2
MDI ml/min	>8	3-8	0<3
Vodoodbojnost prsti	brez	zmerna	močna

### 4.2.4.3 Rezultati meritev vodoodbojnosti

Rezultate vodoodbojnosti z WDPT testom in MDI meritvami smo združili v skupne preglednice po tipih tal zaradi lažje primerjave (preglednice od 16 do 18).

Preglednica 16: Rezultati meritev vodoodbojnosti na distrično rjavih tleh

Številka vzorčnega mesta	WDPT ponovitve [s]					MDI [ml]			
	1	2	3	Povprečje	Razred	Začetni V	Končni V	Razlika	Razred
Travnik 1	34	73	82	63.0	2	92	88	4	1
Travnik 2	2	3	4	3.0	0	85	82	3	1
Travnik 3	2	2	3	2.3	0	55	43	12	0
Travnik 4	3	9	14	8.7	1	91	80	11	0
Travnik 5	3	4	10	5.7	1	84	74	10	0
Travnik 6	7	9	26	14.0	1	54	12	10	0
Travnik 7	2	3	4	3.0	0	89	82	19	0
Travnik 8	5	6	7	6.0	1	81	75	6	1
Travnik 9	2	3	2	2.3	0	74	59	15	0
Travnik 10	4	15	16	11.7	1	87	68	19	0
<b>Povprečje</b>				<b>12.0</b>	<b>0.7</b>			<b>10.9</b>	<b>0.3</b>

Se nadaljuje...



... nadaljevanje preglednice 16

Gozd	<b>1</b>	87	97	122	102.0	2	27	25	2	2
Gozd	<b>2</b>	30	37	107	58.0	1	30	29	1	2
Gozd	<b>3</b>	43	102	206	117.0	2	38	35	3	1
Gozd	<b>4</b>	1	1	2	1.3	0	71	60	11	0
Gozd	<b>5</b>	45	47	87	59.7	1	85	79	6	1
Gozd	<b>6</b>	38	49	107	64.7	2	49	47	2	2
Gozd	<b>7</b>	18	90	105	71.0	2	59	55	4	1
Gozd	<b>8</b>	136	160	178	158.0	2	76	73	3	1
Gozd	<b>9</b>	15	18	24	19.0	1	82	78	4	1
Gozd	<b>10</b>	6	12	14	10.7	1	87	85	2	2
<b>Povprečje</b>					<b>66.1</b>	<b>1.4</b>			<b>3.8</b>	<b>1.3</b>

Preglednica 17: Rezultati meritev vodoodbojnosti na obrečno oglejnih tleh

Številka vzorčnega mesta	WDPT ponovitve [s]					MDI [ml]				
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	Povprečje	Razred	Začetni V	Končni V	Razlika	Razred	
Travnik	<b>1</b>	1	3	1	1.7	0	89	72	17	0
Travnik	<b>2</b>	1	2	7	3.3	0	60	50	10	0
Travnik	<b>3</b>	1	2	2	1.7	0	29	9	20	0
Travnik	<b>4</b>	1	1	2	1.3	0	87	59	28	0
Travnik	<b>5</b>	1	2	1	1.3	0	58	38	20	0
Travnik	<b>6</b>	1	2	3	2.0	0	31	8	23	0
Travnik	<b>7</b>	3	4	5	4.0	0	82	79	3	1
Travnik	<b>8</b>	2	1	1	1.3	0	77	63	14	0
Travnik	<b>9</b>	1	1	1	1.0	0	62	41	21	0
Travnik	<b>10</b>	1	1	2	1.3	0	44	22	22	0
<b>Povprečje</b>					<b>1.9</b>	<b>0</b>			<b>17.8</b>	<b>0.1</b>
Gozd	<b>1</b>	2	4	6	4.0	0	73	65	8	1
Gozd	<b>2</b>	3	5	8	5.3	1	84	74	10	0
Gozd	<b>3</b>	7	38	85	43.3	1	86	85	1	2
Gozd	<b>4</b>	34	41	50	41.7	1	23	19	4	1
Gozd	<b>5</b>	270	248	162	226.7	2	27	25	2	2
Gozd	<b>6</b>	2	2	3	2.3	0	68	66	2	2
Gozd	<b>7</b>	5	30	48	27.7	1	76	72	4	1
Gozd	<b>8</b>	360	420	425	401.7	2	78	77	1	2
Gozd	<b>9</b>	2100	2240	2300	2213.3	3	86	85	1	2
Gozd	<b>10</b>	1260	1270	∞	1265.0	3	86	86	0	2
<b>Povprečje</b>					<b>423.1</b>	<b>1.4</b>			<b>3.3</b>	<b>1.5</b>

Preglednica 18: Rezultati meritev vodoodbojnosti na kolvialnih psevdoglejnih tleh

Številka vzorčnega mesta	WDPT ponovitve [s]					MDI [ml]				
	1	2	3	Povprečje	Razred	Začetni V	Končni V	Razlika	Razred	
Travnik	1	5	9	11	8.3	1	91	81	10	0
Travnik	2	1	3	10	4.7	0	63	47	16	0
Travnik	3	1	3	4	2.7	0	80	73	7	1
Travnik	4	2	3	14	6.3	1	71	65	6	1
Travnik	5	4	6	11	7.0	1	64	59	5	1
Travnik	6	3	4	5	4.0	0	57	50	7	1
Travnik	7	1	3	3	2.3	0	48	39	9	0
Travnik	8	4	6	16	8.7	1	37	28	9	0
Travnik	9	3	4	5	4.0	0	87	74	13	0
Travnik	10	4	5	7	5.3	1	72	65	7	1
<b>Povprečje</b>					<b>5.3</b>	<b>0.5</b>			<b>8.9</b>	<b>0.5</b>
Gozd	1	2	3	4	3.0	0	74	73	1	2
Gozd	2	1	2	3	2.0	0	79	75	4	1
Gozd	3	5	7	14	8.7	1	69	66	3	1
Gozd	4	2	3	7	4.0	0	83	82	1	2
Gozd	5	2	2	6	3.3	0	86	84	2	2
Gozd	6	600	1080	1955	1211.7	3	87	86	1	2
Gozd	7	1	2	1	1.3	0	76	64	12	0
Gozd	8	1	2	7	3.3	0	80	77	3	1
Gozd	9	1	1	1	1.0	0	83	81	2	2
Gozd	10	1	2	1	1.3	0	90	87	3	1
<b>Povprečje</b>					<b>124.0</b>	<b>0.4</b>			<b>3.2</b>	<b>1.4</b>

## 5 ANALIZA REZULTATOV

### 5.1 Analiza meritev infiltracije

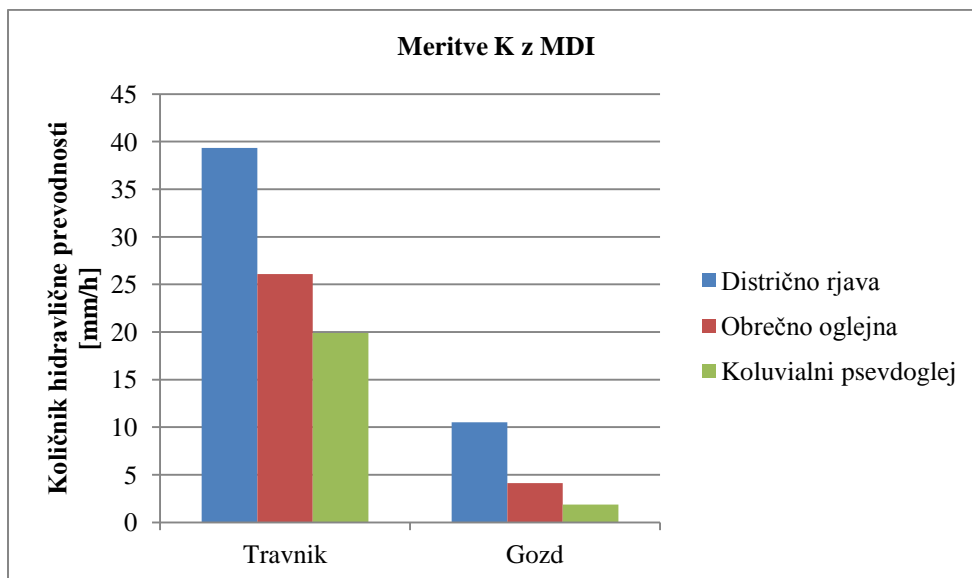
Meritve infiltracije z MDI smo dodatno preverili z DRI metodo, ki je standardizirana in zato bolj verodostojna metoda. Iz rezultatov MDI vidimo, da je infiltracija v tleh, poraščenih z gozdom, dosti manjša od infiltracije na travniku (Slika 42). Najvišji količnik hidravlične prevodnosti z MDI imajo distrično rjava tla, sledijo obrečno oglejna in koluvialno psevdoglejna tla (Preglednica 19). Podobne rezultate je dobila že Jordan, (2010). Avtorica je infiltracijo merila na istem porečju, na bližnjih lokacijah. Uporabila pa je drugačno, a primerljivo klasifikacijo zemljin. Rezultati naših meritev so sicer višji, kar je verjetno posledica močne suše, pomanjkanja padavin in visokih temperatur v času merjenja. Dodatno smo izračune naredili tudi po enačbi Dohnala (enačba 25). Tudi v tem primeru so rezultati prepustnosti večji na travniku kot v gozdu, spremeni pa se vrstni red po tipih tal in sicer ima največji količnik hidravlične prevodnosti koluvialni psevdoglej (Preglednica 20).

Preglednica 19: Razvrščene meritve infiltracije z MDI po prepustnosti

Po prepustnosti	$K$ [mm/h]
DR travnik	39.3
OG travnik	26.1
KP travnik	19.9
DR gozd	10.5
OG gozd	4.1
KP gozd	1.9

Preglednica 20: Razvrščene meritve infiltracije z MDI po prepustnosti po Dohnalu

Po prepustnosti	Dohnal $K$ [mm/h]
KP travnik	19.9
DR travnik	16.4
OG travnik	10.6
DR gozd	10.5
OG gozd	4.1
KP gozd	1.9



Slika 42: Meritev K z MDI na vseh tipih tal

Preglednica 21: Meritve infiltracije z DRI

Prepustnot po DRI	K [mm/h]
Travnik Obrečno oglejna tla	182.1
Travnik Koluvalno psevdoglejna tla	167.1
Travnik Distrično rjava tla	78.9

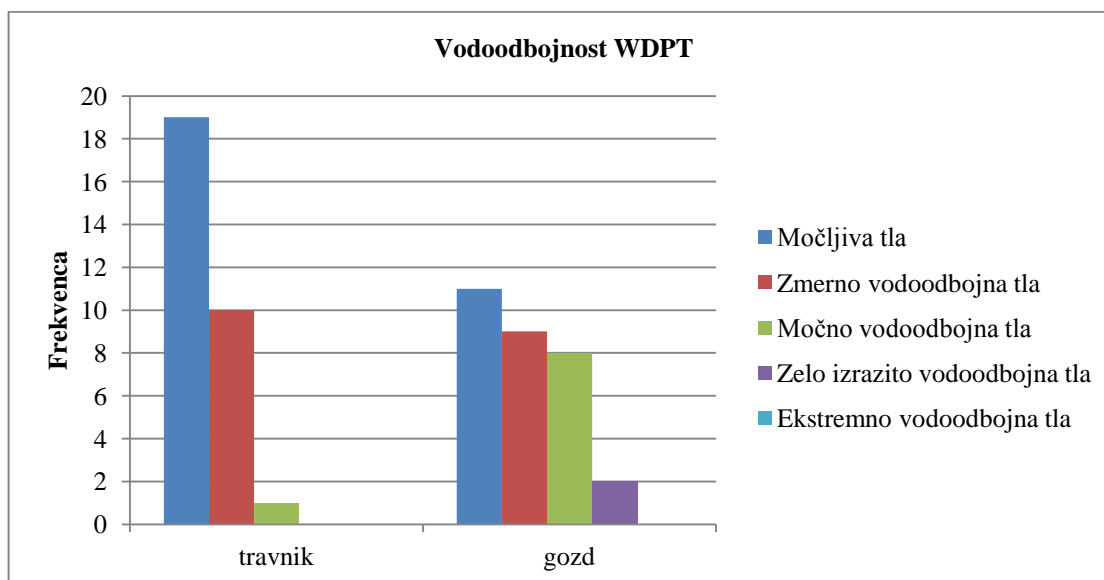
Pri primerjavi vrednosti količnika hidravlične prepustnosti obeh metod merjenja (Preglednice 19, 20 in 21) opazimo velike razlike. Merjenje z dvojnimi obroči nam da veliko višje vrednosti količnika hidravlične prevodnosti, kot meritve z MDI. Do podobnih ugotovitev so prišli tudi mnogi drugi znanstveniki v svojih raziskavah. Na primer Buczko in sodelavci (2006) so z DRI dobili desetkratno vrednost količnika hidravlične prevodnosti. To razliko so pripisali nepopolnemu vlaženju zemljine pod tlačnimi infiltrometri v vodoodbojnih tleh. Tudi Jordan (2010) je z DRI dobila precej višje vrednosti  $K$ . Na velikost infiltracije vplivajo tudi že prej omenjena sezonska nihanja (Simcock, 2006; Fodor, 2010). Meritve so bile opravljene v poletnem času, ki ima najvišjo pričakovano vrednost infiltracije. Suha tla imajo namreč največji gradient privlaka zaradi pomanjkanja vode (Lili, 2008). Poleg tega pa smo imeli pri meritvah z DRI nekaj problem s tesnjenjem Mariottove posode.

Bolj zaskrbljujoča je sprememba vrstnega reda tal po prepustnosti. Nekaj napake lahko pripišemo izvedbi samo ene meritve na vsakem tipu tal, del pa prisotnosti sušnih razpok na obrečno oglejnih in koluvalno psevdoglejnih tleh. Pri merjenju z MDI smo se razpokam lahko izognili, pri meritvah z DRI pa ne. Nastavitev srka pri MDI določa velikost por, v katere se voda lahko infiltrira, pri DRI

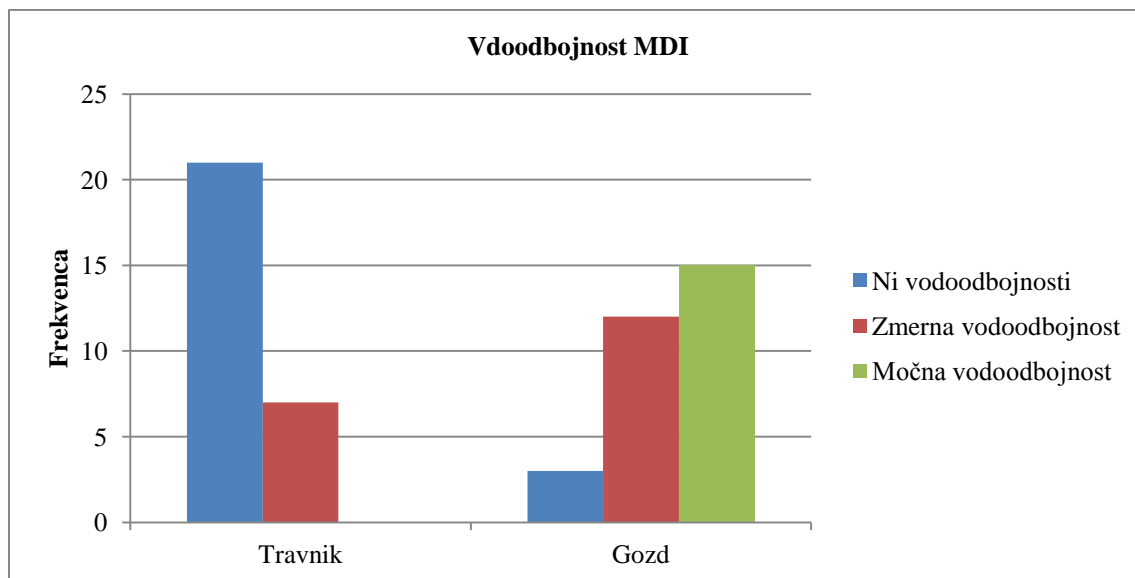
sodelujejo vse pore (Dohnal in sod., 2010). Tudi izbira metodologije izračuna  $K$  pri meritvah z DRI zelo vpliva na rezultate in daje zelo različne vrednosti (Fodor in sod., 2010) pri uporabi enak vhodni izmerjenih podatkov.

## 5.2 Analiza meritev vodoodbojnosti

Meritve vodoodbojnosti smo najprej primerjali med seboj, nato pa smo primerjali še rezultate v gozdu in na travniku. Iz grafov (na sliki 43, 44) in preglednic (preglednici 22, 23) lahko jasno razberemo, da je vodoodbojnost večja v gozdu kot na travniku. Grafi namreč prikazujejo frekvenco oz. število meritev, ki spadajo v določen razred vodoodbojnosti. To sta potrdili obe metodologiji meritev, vidno je povečanje števila razredov bolj odbojnih tal v gozdu. Na primer na vseh tipih tal smo 19 meritev od 30 na travniku uvrstili v razred 0 oz. močljiva tla. V gozdu pa je v razred omočljivih tal uvrščenih samo 11 meritev od 30 (Slika 43). Vzrok zato gre iskati v večji količini organskih snovi v pogozdenih tleh. Zaradi večje biomase pride do večjega odpada odmrlih delcev, ki povečujejo vodoodbojnost. Večjo odbojnost v gozdu so potrdili tudi drugi znanstveniki (Lichner in sod., 2007). Izjema je WDPT meritev v gozdu na koluvialnem psevdogleju, ki izkazuje nenavadno močljiva tla (Slika 47). Meritev z MDI pa nam da na enakih tleh splošni trend večanja vodoodbojnosti v gozdu, ki je razviden na slikah (45-47).



Slika 43: Rezultati vodoodbojnosti WDPT za vse tipe tal



Slika 44: Rezultati meritev vodoodbojnosti z MDI za vse tipe tal

Preglednica 22: Statistike WDPT meritve vodoodbojnosti

WDPT [s]	Distrično rjava tla		Obrečno oglejna tla		Koluvialni psevdoglejna tla	
	travnik	gozd	travnik	gozd	travnik	gozd
Minimalna vrednost	2.3	1.3	1.0	2.3	2.3	1.0
Maksimalna	63.0	158.0	4.0	2213.3	8.7	1211.7
Povprečje	12.0	66.1	1.9	423.1	5.3	124.0
Standardna deviacija	18.4	49.4	1.0	739.8	2.2	382.2
Povprečje razreda	0.7	1.4	0.0	1.4	0.5	0.4

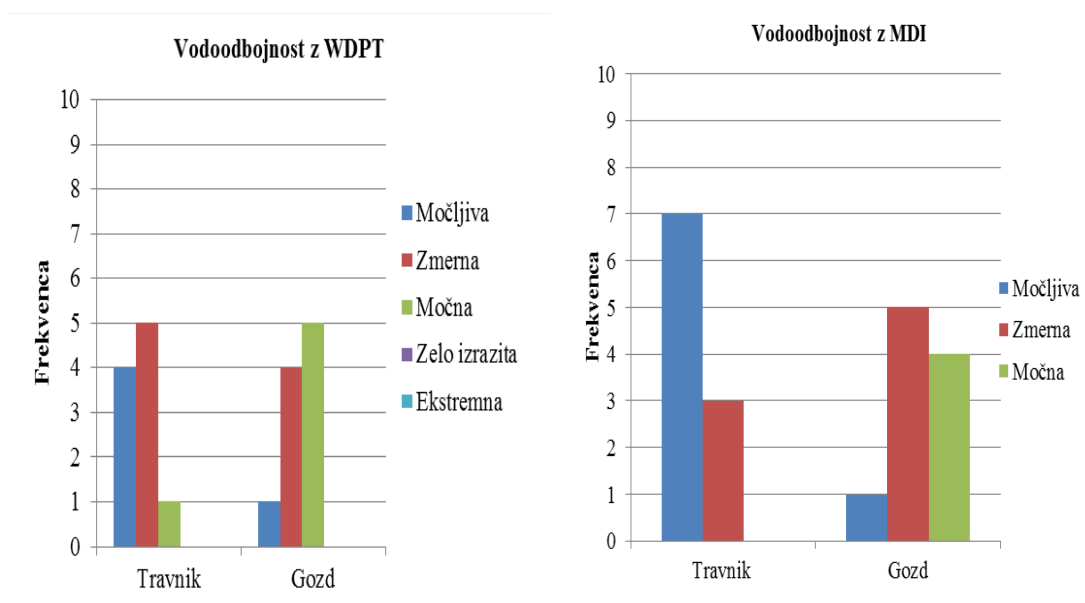
Preglednica 23: Statistike MDI meritve vodoodbojnosti

MDI [ml]	Distrično rjava tla		Obrečno oglejna tla		Koluvialni psevdoglejna tla	
	travnik	gozd	travnik	gozd	travnik	gozd
Minimalna vrednost	3.0	1.0	3.0	0.0	5.0	1.0
Maksimalna	19.0	11.0	28.0	10.0	16.0	12.0
Povprečje	10.9	3.8	17.8	3.3	8.9	3.2
Standardna deviacija	5.6	2.9	7.2	3.3	3.4	3.3
Povprečje razreda	0.3	1.3	0.1	1.5	0.5	1.4

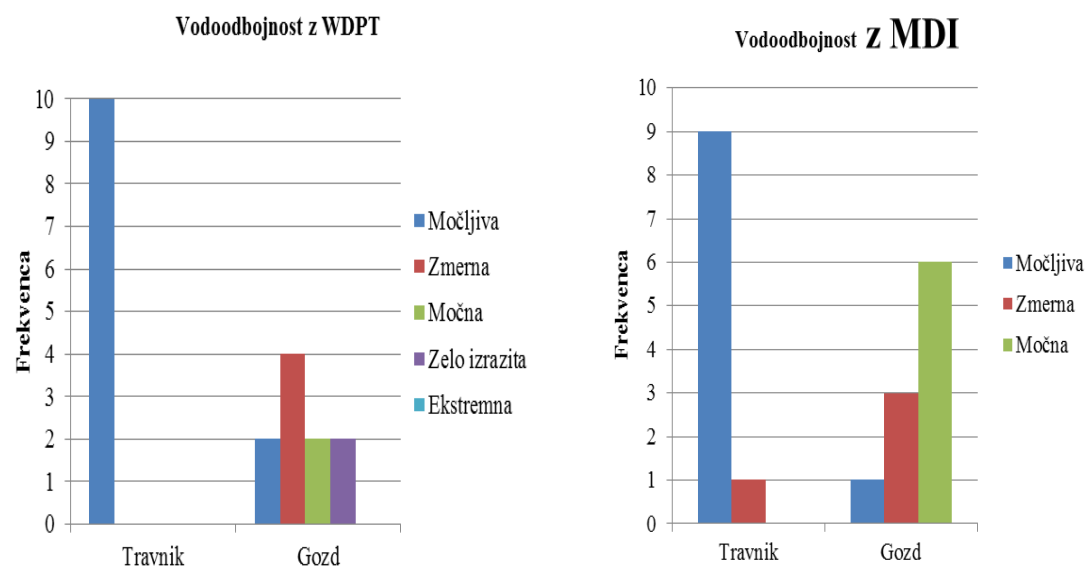
Metoda meritev vodoodbojnosti z MDI upošteva manjše število razredov vodoodbojnosti, kar bi lahko kazalo na manjšo natančnost metode. Iz rezultatov meritev z WDPT testom je razvidna izredna omočljivost obrečno oglejnih tal na travniku, saj vseh deset meritev pade v razred močljivih tal (Slika 46), ter edini pojav razreda zelo izrazito vodoodbojnih tal v gozdu. Pri tem velja omeniti meritve, pri

kateri je kapljica vztrajala na tleh po več tisoč sekund (obrečno oglejna in koluvialno psevdoglejna tla). Razdalja med merilnimi mesti na travniku in v gozdu pa je bila manjša od 10 m.

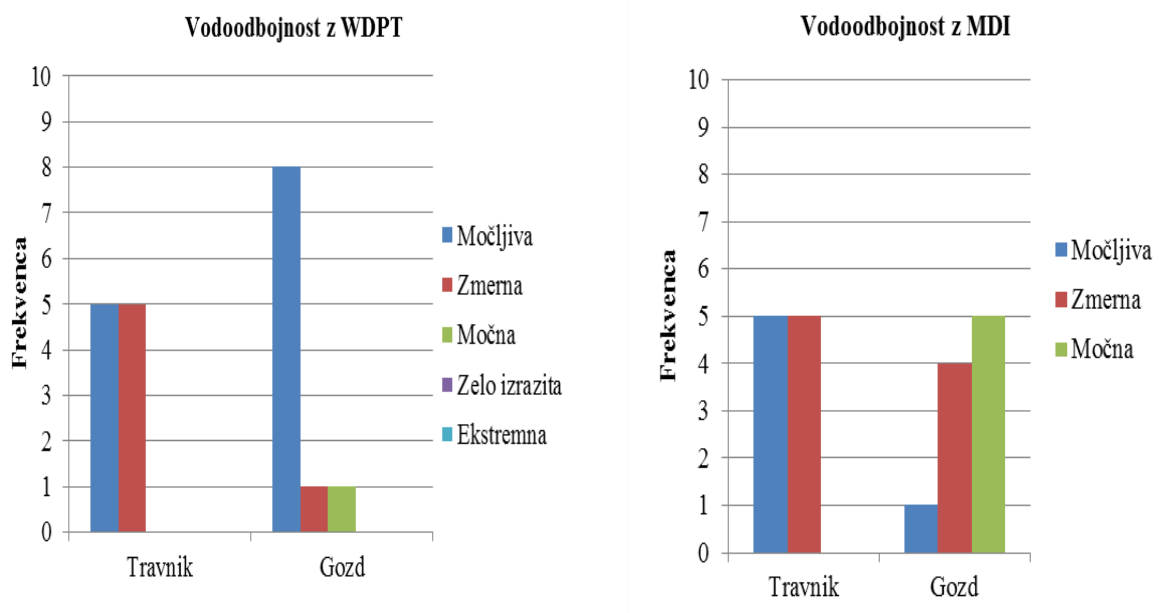
Vodoodbojnost tal je najvišja v poletnih mesecih in je vzrok za nekatere poplave v jeseni, saj večina padavinske vode odteče po površju (Buczko, 2006). Tudi mi smo opravili meritve v poletnem času in bi tako znale biti vrednosti vodoodbojnosti nižje, kot v drugih letnih časih. Kljub vsemu pa lahko potrdimo prisotnost vodoodbojnost v obravnavanih tleh in da je le-ta odvisna tudi od vegetacijskega pokrova oz. rabe tal.



Slika 45: Meritve vodoodbojnosti na distrično rjavih tleh



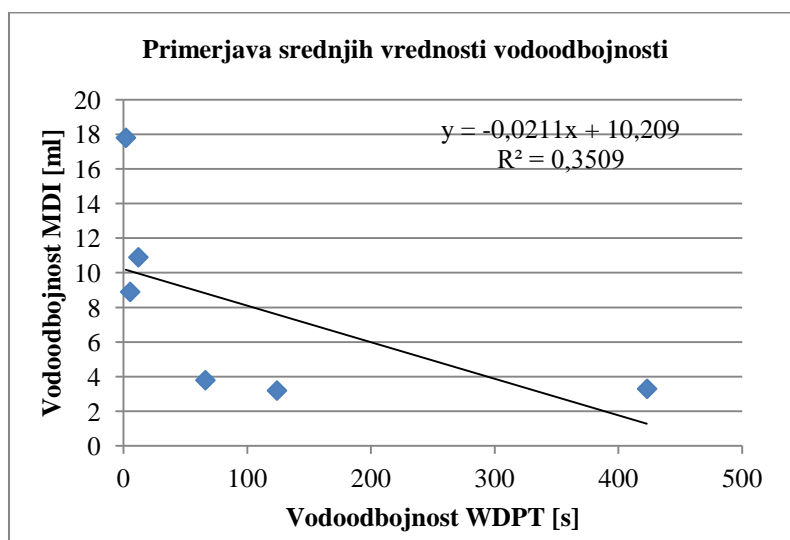
Slika 46: Meritve vodoodbojnosti na obrečno oglejnih tleh



Slika 47: Meritve vodoodbojnosti na koluvialnih psevdoglejnih tleh

### 5.3 Ugotavljanje medsebojnih odvisnosti meritev

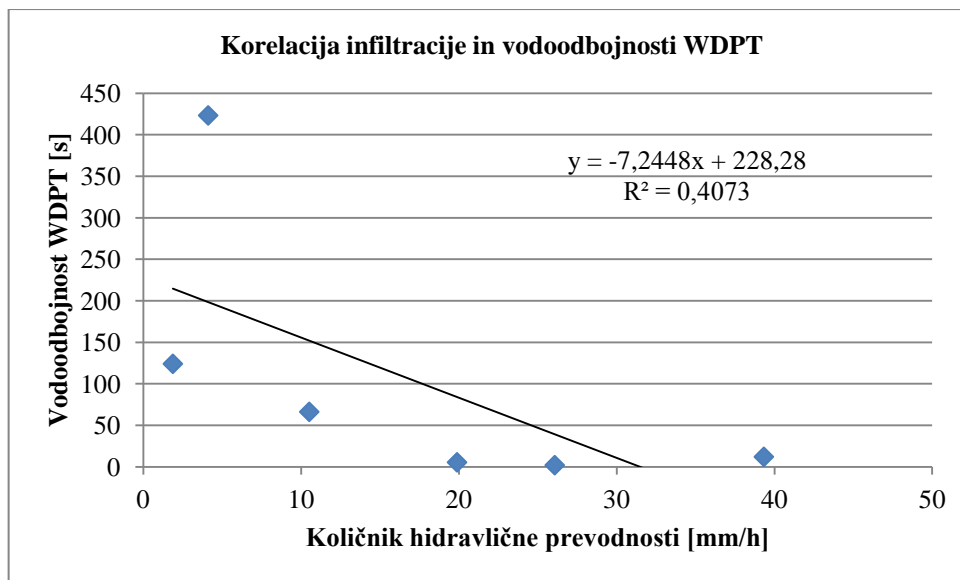
Med rezultati obeh testov vodoodbojnosti smo pričakovali večjo podobnost. Analiza je pokazala, da koeficient korelacije negativen in znaša 0.59. Negativna korelacija je logična, saj se pri testu MDI meri volumen infiltrirane vode, pri WDPT testu pa čas infiltracije. Torej za MDI test velja, da več kot se vode infiltrira bolj močljiva je zemljina (Slika 48). Pri WDPT, kjer se meri čas ponikanja vodne kapljice, pa pomeni krajši čas bolj močljiva tla. Analiza je pokazala srednje dobro povezanost. Razlog je verjetno v tem, da je MDI težko neposredno primerjati z WDPT, saj ima MDI metoda širše razrede. Tudi analize drugih avtorjev niso pokazale tesne povezanosti (Edbrooke in Lavklich, 2009).



Slika 48: Korelacija med meritvami vodoodbojnosti po obeh metodah

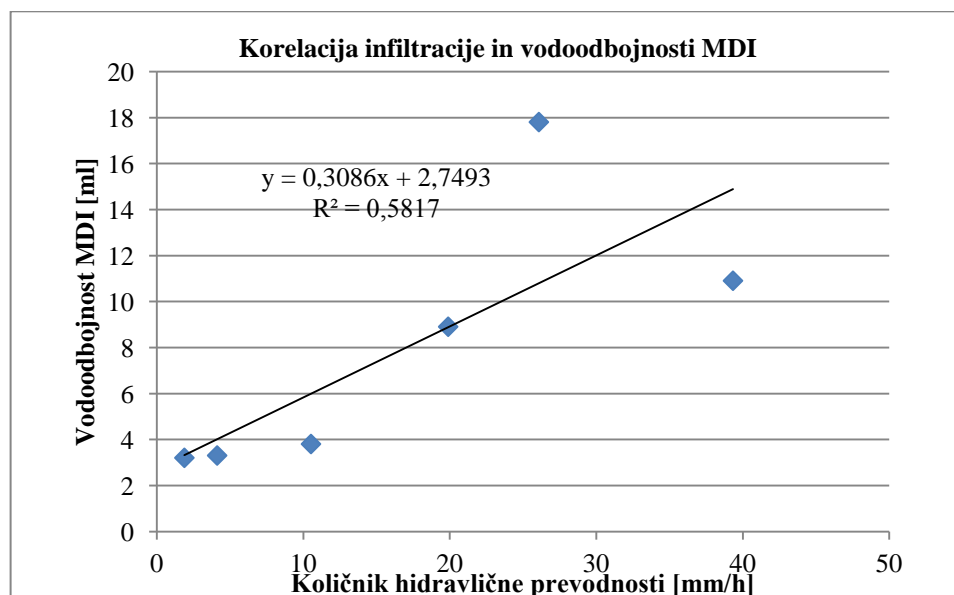


Ovisnost vodoodbojnosti po WDPT in infiltracije (MDI) je prikazana na sliki 49. Korelacijski koeficient znaša 0.64 in je negativen. Negativna povezanost je bila pričakovana, saj daljši čas pri testu vodoodbojnosti WDPT pomeni večjo vodoodbojnost tal in zato manjšo infiltracijo.



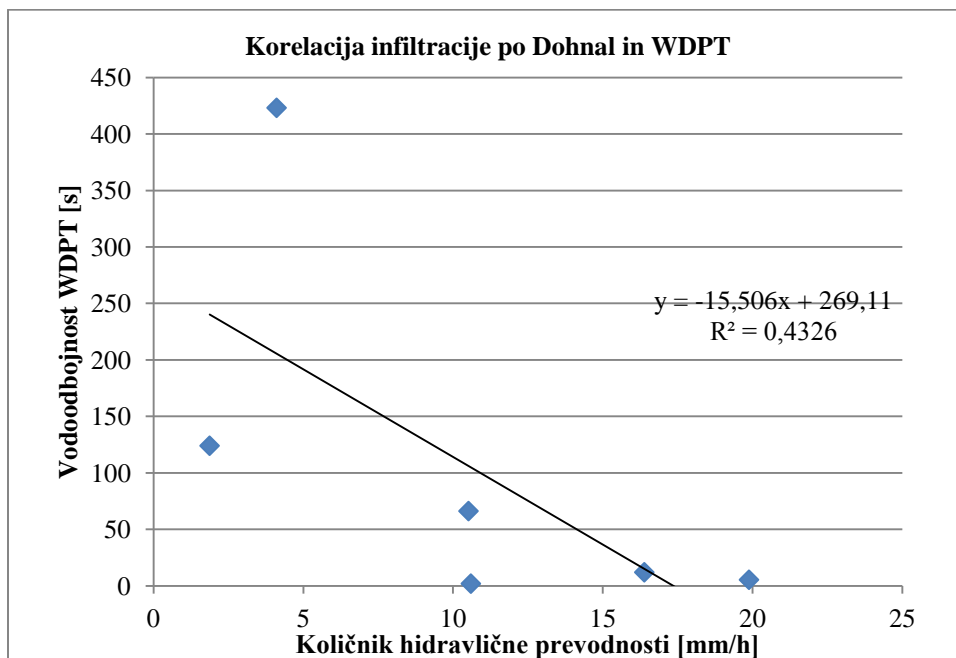
Slika 49: Korelacija med infiltracijo in vodoodbojnostjo po testu WDPT

Pri analizi vodoodbojnosti po MDI in infiltraciji z MDI smo ugotovili pozitivno korelacijo z vrednostjo 0.72 (Slika 50). Pozitivna korelacija je smiselna, saj večji volumen infiltrirane vode pri testu vodoodbojnosti z MDI kaže bolj močljiva tla. Iz naštetega sklepamo, da vodoodbojnost zmanjšuje velikost hidravličnega količnika in tako zmanjšuje infiltracijo.



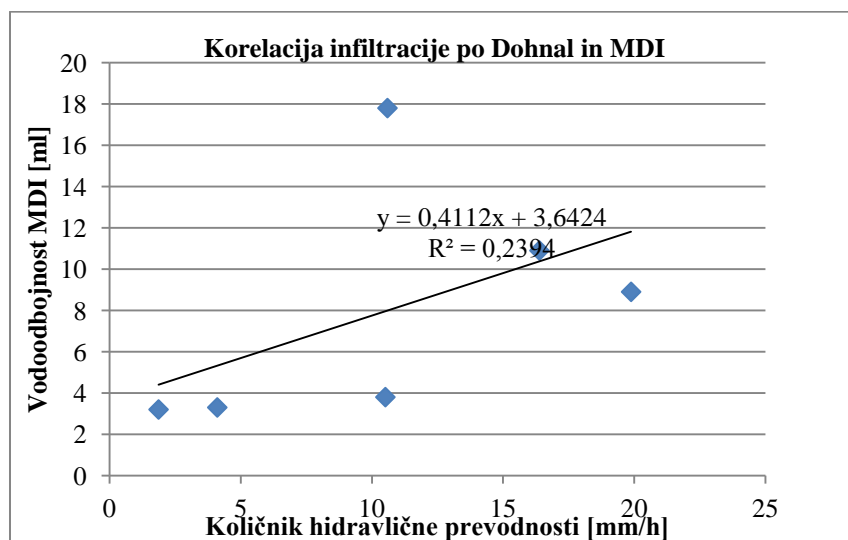
Slika 50: Korelacija med infiltracijo in vodoodbojnostjo po testu MDI

Povezanost vodoodbojnosti po WDPT in infiltracije po Dohnalu znaša 0.65 (Slika 51). Korelacija je negativna, saj bolj vodoodbojna tla kasneje vpijejo kapljice vode in zmanjšujejo infiltracijo. Ugotovimo lahko, da je korelacija med WDPT in infiltracijo po izboljšani enačbi Dohnala le malenkost boljša od korelacije pri neizboljšani enačbi.



Slika 51: Korelacija infiltracije po Dohnal in vodoodbojnosti po testu WDPT

Korelacija vodoodbojnosti po MDI in infiltracije po Dohnalu je pozitivna in znaša samo 0.49 (Slika 52). Pričakovali smo tesnejšo povezavo, saj je korelacija med vodoodbojnostjo po MDI testu in infiltracijo, izračunano po neizboljšani enačbi, znašala kar 0.72.



Slika 52: Korelacija infiltracije po Dohnal in vodoodbojnosti po testu MDI

Naredili smo tudi analize med posameznimi meritvami, ki pa niso pokazale očitnih povezav. To bi lahko pripisali nehomogenosti tal. Na osnovi analize srednjih vrednosti pa lahko ugotovimo, da povezava med infiltracijo in vodoodbojnostjo vsekakor je prisotna. Infiltracija se z večanjem vodoodbojnosti manjša. To so potrdile prav vse meritve.

Poleg tega lahko ugotovimo, da je infiltracija manjša v gozdu kot na travniku. Čeprav je količnik hidravlične prevodnosti, ki predstavlja infiltracijo, močno zmanjšan v tleh poraslih z gozdom, ne moremo te razlike pripisati samo vodoodbojnosti, saj pri naših raziskavah nismo zajeli drugih vplivov. Z dodatnimi meritvami, ki bi upoštevale tudi začetno vlažnost in gostoto tal ter preizkusi v laboratoriju, pa bi to lahko tudi potrdili ali ovrgli.

Dodatno smo opazili večjo verjetnost negativne meritve infiltracije z MDI na bolj vodoodbojnih tleh. Negativne vrednosti pri meritvah z MDI so v svojih raziskavah dobili tudi drugi raziskovalci (Wang in sod., 1999; Angulo-Jaramillo in sod., 2000; Jordan, 2010; Decagon Devices 2012).

## 6 ZAKLJUČKI

Infiltracija je del hidrološkega kroga, ki pomembno vpliva na vse procese na Zemlji. Glavni dejavniki, ki vplivajo na infiltracijo so: tekstura in struktura tal, poroznost, kemijska sestava, količina organskega materiala, relief, padavine, čas in vodoodbojnost tal. Največji vpliv imajo človeške dejavnosti, saj človek spreminja skoraj vse našete dejavnike. Človek je s svojim pohlepnim in brezbržnim razvojem dodobra spremenil Zemljo in s tem tudi procese na njej. V zadnjem času smo priča vse večjim nihanjem podnebja in globalnemu segrevanju.

In prav ta ekstremna nihanja povečujejo stopnjo tveganja in povečujejo število naravnih nesreč. Spremembe infiltracije vplivajo na količino voda, tako površinskih kot podpovršinskih. Posledice so lahko huda erozija tal, plazovi, onesnaževanje vodotokov, pojav hudourniških poplav in še bi lahko naštevali. Navsezadnje so ogrožena tudi človeška življenja in biodiverziteteta.

Vodoodbojnost tal se povečuje z ekstremnimi spremembami v naravi in tako še dodatno vpliva na infiltracijo. V prihodnosti si tako lahko obetamo večje število jesenskih poplavnih dogodkov, katerih vzrok bo tudi vodoodbojnost tal po izredno suhih poletjih. Vodoodbojnost pa vpliva tudi na kmetijsko rabo zemljišč in pogojuje izbiro kmetijskih rastlin. Hidrofobnost tal povečuje tudi erozijo prsti in transport sedimentov (Doerr in sod., 2006).

V nalogi smo z meritvami določali količnik hidravlične prevodnosti, ki je najpomembnejši parameter infiltracije (Fodor in sod., 2010). Pri meritvah infiltracije smo uporabili minidisk infiltrometer (MDI) in infiltrometer z dvojnimi obroči (DRI). Meritve smo izvajali na treh tipih tal in dveh različnih rabah tal. V splošnem smo dobili večje vrednosti količnika hidravlične prevodnosti ( $K$ ) na travniku, kakor v gozdu. Meritve infiltracije z DRI so bile nekajkrat višje kakor MDI, kar pa ni nič nenavadnega, saj so podobne rezultate dobili tudi drugi raziskovalci (Buczko in sod., 2006; Jordan, 2010). Pri meritvah z MDI v gozdu smo dobili veliko število negativnih vrednosti in smo zato morali izvesti dodatne meritve. Negativne vrednosti bi lahko bile posledica večje vodoodbojnosti, kar bi morali preveriti z dodatnimi preizkusi v laboratoriju. Niso pa nič nenavadnega, saj o tem poročajo tudi drugi raziskovalci (Wang in sod., 1999; Jordan, 2010; Decagon Devices, 2012).

Meritve vodoodbojnosti smo izvedli s standardnim testom penetracije vodne kapljice v tla (WDPT) (DeBano, 1981; Doerr, 1998) in novejšim testom s pomočjo minidisk infiltrometra (MDI) (Robichaud in sod., 2008). Pri obeh metodah smo dobili precej razpršene rezultate. Srednje vrednosti meritev smo medsebojno primerjali in ugotovljali medsebojne povezave. Analize so potrdile vpliv vodoodbojnosti na infiltracijo in vpliv vegetacije na vodoodbojnost. Ugotovili smo tesno povezavo med vodoodbojnostjo in infiltracijo. Ko se vodoodbojnost veča, se manjša količnik hidravlične prevodnosti  $K$  in z njim infiltracija. Meritve so pokazale močno povečanje vodoodbojnosti v gozdu. Tla na travniku so bila dosti bolj močljiva. Meritve infiltracije z različnimi metodami niso prinesle enakih rezultatov.

Za bolj natančno in učinkovito merjenje vodoodbojnosti bi morali v raziskave vključiti večje število dejavnikov: strukturo tal, kemijsko sestavo hidrofobnih snovi, vpliv prstnatih tokov, vpliv vegetacije, mikrobiološko sestavo, klimo in mikroklimo.

Meritve so bile izvedene v krajšem poletnem obdobju. Za boljše poznavanje in napovedovanje povezav ter natančnost meritev bi morali izvesti meritve v različnih obdobjih, saj sta infiltracija in vodoodbojnost sezonsko spremenljiva.

## 7 VIRI

Angulo-Jaramillo R., Vandervaere J.-P., Roulier S., Thony J.-L., Gaudet J.-P., Vauclin M. 2000. Field measurement of soil hydraulic properties by disc and ring infiltrometers. A review and recent developments. *Soil Tillage Research* 55: 1–29.

Arriaga F.J., Kornecki T. S., Balkcom K. S., Raper R.L. 2010. A method for automating data collection from a double infiltrometer under falling head conditions. *Soil Use and Management* 24: 61–67.

Atlas okolja, 2012.

<http://gis.arso.gov.si/atlasokolja> (Pridobljeno 15. 8. 2012.)

Bat, M., Frantar, P. 2000. Vodna bilanca = Water Balance.

[http://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/vodna%20bilanca/02\\_Metodologija.pdf](http://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/vodna%20bilanca/02_Metodologija.pdf) (Pridobljeno 13. 8. 2012.)

Brilly, M. in Šraj, M. 2005. Osnove hidrologije. Ljubljana, Univerzitetni učbenik. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani: 234 str.

Brilly, M., Globevnik, L., Štravs, L., Rusjan, S. 2005. Eksperimentalna porečja v Sloveniji. V: Kozmus, K. (ur.), Kuhar, M. (ur.). Raziskave s področja geodezije in geofizike. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 47–59.

[http://www.fgg.uni-lj.si/sugg/referati/2005/SZGG\\_05\\_Brilly\\_et\\_al.pdf](http://www.fgg.uni-lj.si/sugg/referati/2005/SZGG_05_Brilly_et_al.pdf) (Pridobljeno 11. 8. 2012.)

Buczko, U., Bens, o., Huttl, R.F. 2006. Water infiltration and hydrophobicity in forest soils of a pine-beech transformation chronosequence. *Journal of Hydrology* 331: 381–395.

Burt, R. (ur.). 2009. Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual. Nebraska USA, Lincoln, Soil Survey Investigations. Report No. 51, Version 1.0. U.S. Department of Agriculture: 96–98.

Chang, Y.-J. 2010. Predictions of saturated hydraulic conductivity dynamics in a Midwestern agricultural watershed, Iowa. Master's thesis, University of Iowa: 75 str.

DeBano, L.F. 1981. Water repellent soils a state-of-the-art. Berkeley, California, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station: 21str.

DeBano, L.F. 1999. Water repellency in soils: a historical overview. *Journal of Hydrology* 231-232: 4-32 str.

Decagon Devices. 2006. Mini Disk Infiltrometer, Users Manual version 9. Decagon Devices Pullman, WA 99163, Inc.

<http://www.decagon.com/assets/Manuals/Manual-Infiltrometer.pdf> (pridobljeno 5. 5. 2012.)

Dekker, L. W., Ritsema, C. J., Oostindie, K., Boersma, O. H. 1998. Effect of drying temperature on the severity of soil water repellency. *Soil Science* 163 10: 780-790.

Diamond, J. in Shanley, T. 1998. Infiltration rate assessment of some major soils. European Agricultural Guidance and Guarantee Fund, European Union: 14 str.

Doerr, S. H. 1998. Short communication on standardizing the water drop penetration time and the molarity of an ethanol droplet techniques to classify soil hydrophobicity. *Earth Surface Processes and Landforms* 23: 663-668.

Doerr, S. H., Shakesby, R. A., Walsh, R. P. D. 2000. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydrogeomorphological significance. *Earth-Science Reviews* 51: 33-56.

Doerr, S.H., Shakesby, R. A., Dekker, L. W., Ritsema, C. J. 2006. Occurrence, prediction and hydrological effects of water repellency amongst major soil and land-use types in humid temperate climate. *European Journal of Soil Science*, October 2006, 57: 741-754.

Dohnal, M., Dušek, J., Vogel, T. 2010. Improving Hydraulic Conductivity Estimates from Mini Disk Infiltrometer Measurements for soils with Wide pore-size Distributions. *Soil Science of America Journal* 71: 1469-1472.

Edbrooke, M. in Lavkulich, L. M. 2009. Hydrophobicity of Soils in Relation to Pine Beetle Infestation. University of British Columbia, Faculty of Land and Food Systems, Vancouver Canada: 10 str.

Eijkelkamp. 2012, 0.9.04 Double ring infiltrometer operating instructions: 9 str.

<http://www.eijkelkamp.com/files/media/Gebruiksaanwijzingen/EN/m1-0904eringinfiltrometer.pdf>  
(Pridobljeno 15. 8. 2012.)

Espinoza, D. R. 1999. Infiltration. V: Dellur, J. W. (ur.) *The handbook of Groundwater Engineering*, Florida, USA. CRC Press LLC, poglavje 6: 35 str.

Fodor, N., Sandor, R., Orfanus, T., Lichner, L., Rajkai, K. 2011. Evaluation method dependency of measured hydraulic conductivity. *Geoderma* 165: 60–68.

Geopedia, 2012. Karte porečja.

[http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas\\_Okolja\\_AXL@Arso](http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso) (Pridobljeno 7. 8. 2012.)

Glenn, N.F., Finley, C.D. 2009. Fire and vegetation type effects on soil hydrophobicity and infiltration in the sagebrush-steppe: I. Field analysis. *Journal of Arid Environments* 74: 653–659.

Groen, M., Groen, K., van Huissteden, K., in sod. 2006. Field instrumentation course Twente: 74 str.

Hallett, P. D. 2007. An introduction to soil water repellency. V: Gaskin R. (ur.) An introduction to soil water repellency: Proceedings of the 8th International Symposium on Adjuvants for Agrochemicals (ISAA2007). Columbus, Ohio, USA. 6-9 Avgust 2007. International Society for Agrochemical Adjuvants (ISAA)

Han, D. 2010. Concise Hydrology. Dawei Han and Ventus publishing ApS. www.BookBooN.com : 145 str.

Maček, M. 2006. Sukcija zemljin. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Maček): 68 str.

Madsen, M.D., in Chandler, D.G. 2007. Automation and use of mini disk infiltrometers. *Soil Science of America Journal* 71: 1469-1472.

Minasny, B. 2000. Efficient methods for predicting soil hydraulic properties. Doctoral thesis Department of Agriculture Chemistry and Soil Science. The university of Sydney. New South Wales Australia. Chapter 8 : 333-35.

Musly, A. in Higy, C. 2011. Hydrology A Science of Nature. Enfield, New Hampshire, USA. Science Publishers: 315 str.

Karnok, K. in Tucker, K. 2002. Water-repellent soils Part I: Where are we now?. Issue of GCM, June 2002.

Lichner, L., Orfánus, T., Nováková, K., Šir, M., Tesař, M. 2007. The Impact of vegetation on Hydraulic Conductivity of Sandy Soil. *Soil and Water Research*, 2: 59-66.

Lili, M., Bralts, V. F., Yinghua, P., Han, L., Tingwu, L. 2008. Methods for measuring soil infiltration: State of the art. *Int J Agric & Biol Eng*, 1: 22-30.

Oosterbaan, R.J., Nijland, H.J. 1994. Determining the saturated hydraulic conductivity. V: Ritzema, H.P.(ur.) Drainage Principles and Applications. International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI), NL, Publication 16. NL. Poglavje 12: 38 str.

Pestotnik, S. 2011. Hidrološki model Glinščice s programom Flo-2D. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezija (samozaložba S. Pestotnik): 80 str.



Philip, J. R. 1957. The theory of infiltration. 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. Soil Science 84: 257-264.

Poulter, R. Soil Water Repelley. Cleveland, Department of Primary Industries and Fisheries, Redlands Research Station. V: Carson, C. (ur.). Healty soils for great turf: proceeding of workshop held at Cleveland, 20 February 2006.

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

Repe, B. 2006. Pedografska karta in njena uporabnost v geografiji. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za filozofijo, oddelek za geografijo (samozaložba B. Repe): 127 str.

Repe, B. 2006. Svetovna klasifikacija prsti. Geografski obzornik. Letn. 53, št. 1(2006): 9-22 str.  
<http://www.dlib.si/v2/StreamFile.aspx?URN=URN:NBN:SI:doc-AHVZWTZZ&id=ead4f22b-830d-4c52-b275-38c8c671849a&type=PDF> (Pridobljeno 2. 8. 2012.)

Robichaud, P. R., Lewis. S. A., Ashmun, L. E. 2008. New Procedure for Sampling Infiltration to Assess Post-fire Soil Water repellency. Rocky Mountain Research Station, USA, United States Department of Agriculture

Rusjan, S., Fazarinc, R., Mikoš, M. 2003. Možnosti za revitalizacijo urbanih vodotokov na primeru Glinščice v Ljubljani. = River rehabilitation of urban watercourses on the example of the Glinščica river in Ljubljana. Acta hydrotechnica 21/34: 22 str.  
<ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/acta/a34sr.pdf> (Pridobljeno 5. 8. 2012)

Simcock, R. 2006. Stormwater and erosion in the urbanising Acacia Heights Catchment, Taupo. NZ. Landcare Research New Zealand: 59 str.

Smith, R.E., Smettem, K. R. J., Broadbridge, P., Woolhiser, D. A. 2002. Infiltration Theory for Hydrologic Applications. Washington, American Geophysical: 212 str.

Soil physics <http://soilphysics.okstate.edu/software/water/infil.html> (Pridobljeno 3. 8. 2012)

Sławiński, C., Witkowska-Walczak, B., Walczak, R.T. 2004. Determination of water conductivity coefficient of soil porous media. Institute of Agrophysics PAS: 96 str.

Steinman, F. 2010. Hidravlika. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem: 285 str.

Štajdohar, M., 2005. Analiza vpliva urbanizacije na režim odtoka Glinščice. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Štajdohar): 92 str.

Štrukelj, J., 2010. Ugotavljanje pojava vodoodbojnosti v tleh na golf igrišču Bled. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta oddelek za agronomijo (samozaložba J. Štrukelj): 33 str.

Wang D., Yates S. R., Lowery, B., van Genuchten, M. T. 1998 Estimating soil hydraulic properties using tension infiltrometers with varying disk diameters. *Soil Science* vol. 163. 5: 356-361

Wang, Z., Wu, Q. J., Wu. L., Ritsema, C.J., Dekker, L. W., Feyen, J. 1999. Effect of soil repellency on infiltration rate and flow instability. *Journal of Hydrology* 231-232: 265-276.

York, C. A. in Baldwin, N. A. 1992. Dry patch on golf greens: a review. *The Journal of the Sports Turf Research Institute* Vol.68: 19 str.

Van Genuchten, M. T. 1980. A close-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science of America Journal* 44: 892-898.

Vandervaere, J.-P., Vauclin, M., Elrick, D. E. 2000. Transient Flow from Tension Infiltrometers: I. The Two-Parameter Equation. *Soil Science Society of America Journal* 64:1263–1272.

Tuller, M., Or, D. 2008. Infiltration into Soils. Lecture. *Introduction to Soil Physics*. ETH