

# Empirijsko određivanje hidrauličke vodljivosti i simulacija transporta potencijalno toksičnih metala u programu HYDRUS 1D

---

Kucelj, Mišo

Master's thesis / Diplomski rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:757709>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom](#).

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-23**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij geološkog inženjerstva

**EMPIRIJSKO ODREĐIVANJE HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI I  
SIMULACIJA TRANSPORTA POTENCIJALNO TOKSIČNIH  
METALA U PROGRAMU HYDRUS 1D**

Diplomski rad

Mišo Kucelj

GI-187

Zagreb, 2016.

**Zahvale:**

*Veliku zahvalu dugujem svom mentoru docentu dr. sc. Stanku Ružičiću na strpljivosti, volji, dostupnosti te stručnim savjetima i velikoj pomoći prilikom izrade ovog diplomskog rad.*

*Također se zahvaljujem profesorici dr.sc. Mileusnić i profesoru dr.sc. Posavcu, kao ocjenjivačima na svojim prijedlozima i komentarima.*

*Veliku zahvalu i posvetu dajem svojoj obitelji koja je bila moja najveća potpora i podrška tokom cijelog studija.*

*Te na kraju veliko hvala svim mojim prijateljima i kolegama.*

EMPIRIJSKO ODREĐIVANJE HIDRAULIČKE VODLJIVOSTI I SIMULACIJA TRANSPORTA  
POTENCIJALNO TOKSIČNIH METALA U PROGRAMU HYDRUS 1D

MIŠO KUCELJ

Diplomski rad je izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

U ovom diplomskom radu predmet istraživanja je empirijski odrediti hidrauličku vodljivost i simulirati transport potencijalno toksičnih metala u programu HYDRUS 1D. Empirijske formule koje se koriste za određivanje hidrauličke vodljivosti temelje se na korištenju podataka o granulometrijskom sastavu porozne sredine. Rezultati granulometrijskih analiza predstavljaju osnovni i jedini ulazni parametar koji se primjenjuje u empirijskim formulama. Tako je raspon hidrauličke vodljivosti izračunat kod Almayani – Sen od  $4,7 \cdot 10^7$  do  $2,58 \cdot 10^9$ , Breyer od  $5,67 \cdot 10^{-1}$  do 2,15, Hazen od 6,87 do  $2,44 \cdot 10^7$ , Kozney – Carman od  $2,53 \cdot 10^1$  do  $3,37 \cdot 10^7$ , Slitcher od  $2,83 \cdot 10^1$  do  $6,36 \cdot 10^{22}$ , Terzaghi od 5,27 do  $6,35 \cdot 10^{13}$ , USBR od  $6,33 \cdot 10^{-3}$  do  $1,29 \cdot 10^{-1}$ . Navedene vrijednosti prikazane su u cm po danu. Određena je i hidraulička vodljivost pomoću softverskog programa Rosetta – Lite, a ona je u rasponu od 18,8 do 35 cm/dan. Tok vode u tlu je simuliran s HYDRUS 1D programom. Najveće količine vode nalaze se u horizontima A, IC, IIC, a nakon toga količina vode počinje opadati. Simulacija potencijalno toksičnih metala prikazuje da se koncentracija smanjuje s povećanjem dana, odnosno potencijalno toksični metali prodiru sve dublje u tlo ispod točke opažanja. S povećanjem dubine dolazi i do smanjenja sorpcije.

Ključne riječi: hidraulička vodljivost, simulacija, transport, Rosetta - Lite, HYDRUS 1D.

Diplomski rad sadrži: 46 stranica, 21 sliku, 7 tablica, 24 formule i 50 referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta

Voditelj: Doc. dr. sc. Stanko Ružičić

Ocjenjivači: Doc. dr. sc. Stanko Ružičić,  
Izv. prof. dr. sc. Marta Mileusnić,  
Izv. prof. dr. sc. Kristijan Posavec,

Datum obrane: 19.09.2016.

EMPIRICAL DETERMINATION OF HYDRAULIC CONDUCTIVITY AND TRANSPORT  
SIMULATION OF POTENTIALLY TOXIC METALS IN THE HYDRUS 1D PROGRAM

MIŠO KUCELJ

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Department of Geology and Geological Engineering  
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Abstract

The goal of the research is to empirically determine the hydraulic conductivity and simulate the transport of potentially toxic metals in the HYDRUS 1D program. The empirical formula used to determine hydraulic conductivity is based on the data regarding porous media grain-size composition. The grain-size is the basic and only input parameter for calculation using empirical formulas. Thus, the range of hydraulic conductivity is calculated with Almayani – Sen from  $4,7 \cdot 10^7$  to  $2,58 \cdot 10^9$ , Breyer from  $5,67 \cdot 10^{-1}$  to 2,15, Hazen from 6,87 to  $2,44 \cdot 10^7$ , Kozney – Carman from  $2,53 \cdot 10^1$  to  $3,37 \cdot 10^7$ , Slitcher from  $2,83 \cdot 10^1$  to  $6,36 \cdot 10^{22}$ , Terzaghi from 5,27 to  $6,35 \cdot 10^{13}$ , USBR from  $6,33 \cdot 10^{-3}$  to  $1,29 \cdot 10^{-1}$ . These values are shown in cm per day. Also, hydraulic conductivity was determined using the Rosetta – Lite software program, and it ranges from 18,8 to 35 cm/day. The water flow in the soil was simulated using the HYDRUS 1D program. Most water is located in layers horizon A, IIC, IIIC, and then the amount of water begins to decline. The simulation of potentially toxic metals shows that the concentration decreases as the number of days increases days, i.e. potentially toxic metals penetrate deeper into the soil beneath our point of observation. The sorption reduces as the depth increase.

Keywords: hydraulic conductivity, simulation, transport, Rosetta – Lite, HYDRUS 1D.

Thesis contains: 46 pages, 21 figures, 7 tables and 50 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited at: The Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,

Supervisor: Assistant Professor Stanko Ružičić, PhD

Reviewers: Assistant Professor Stanko Ružičić, PhD  
Associate Professor Marta Mileusnić, PhD  
Associate Professor Kristijan Posavec, PhD

Date of defense: September 19<sup>th</sup>, 2016.

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. TEORETSKE OSNOVE.....	2
2.1. Nesaturirana zona.....	2
2.2. Darcy-ev zakon .....	3
2.3. Fizički parametri tla .....	6
2.4. Empirijske formule pomoću kojih se određuje hidraulička vodljivost .....	8
2.4.1. Alyamani i Sen jednadžba.....	9
2.4.2. Beyer jednadžba .....	10
2.4.3. Hazen jednadžba .....	10
2.4.4. Kozeny – Carman jednadžba.....	11
2.4.5. Slichter jednadžba .....	12
2.4.6. Terzaghi jednadžba .....	12
2.4.7. USBR jednadžba .....	13
2.4.8. ROSSETA-LITE program.....	13
2.5. Modeliranje .....	14
2.5.1. Konceptualni model .....	15
2.5.2. Fizički i analogni modeli.....	15
2.5.3. Matematički modeli.....	15
2.5.4. HYDRUS 1D – numerički model toka vode i transporta onečišćenja .....	15
3. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA .....	19
4. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA .....	21
4.1. Geografija područja istraživanja .....	21
4.2. Klimatske značajke .....	22
4.3. Geologija istraživanog područja.....	24
4.4. Pedologija istraživanog područja .....	25
5. METODOLOGIJA.....	27
6. REZULTATI.....	29
6.1. Opis profila tla.....	29
6.2. Gustoća tla.....	29
6.3. Granulometrijski sastav.....	30
6.4. Rezultati empirijskog određivanja hidrauličke vodljivosti dobivene pomoću programa Rosetta - Lite .....	32
6.5. Rezultati prognoznog modela toka vode i transporta potencijalno toksičnih metala .....	32
7. DISKUSIJA.....	37

8. ZAKLJUČAK .....	40
9. LITERATURA.....	41

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Nesaturirana i saturirana zona (preuzeto iz Ružičić, 2013) .....	2
Slika 2.2. Osnovne konvencionalne sheme klasifikacije nekonsolidiranih sedimenata prema veličini zrna: U. S. Department of Agriculture (USDA); International Soil Science Society (ISSS); U. S. Public Road Administration (USPRA); Massachusetts Institute of Technology (MIT); British Standard Institute (BSI); Njemački standardi (DIN); Wentworthova skala (Urumović, 2003) .....	6
Slika 2.3. Klasifikacija i nomenklatura sitnozrnatih sedimenata s obzirom na postotak gline, praha i pijeska (Urumović, 2003; prema USDA).....	7
Slika 2.4. Izgled programu Rosetta Lite.....	14
Slika 4.1. Geografska karta zagrebačkog područja s granicama vodonosnika i lokacijom uzorkovanja (preuzeto iz Jašaragić-Rako, 2015) .....	22
Slika 4.2. Oborine mjerene na mjernoj postaji Botinec .....	23
Slika 4.3. Temperatura izmjerena na mjernoj postaji Botinec .....	23
Slika 4.4. Prikaz evapotranspiracije na mjernoj postaji Botinec .....	24
Slika 4.5. Geološka karta Grada Zagreba i Zagrebačke županije (prezeto iz Bačani i Šparica, 2001) .....	25
Slika 4.6. Isječak pedološke karte unutar zagrebačkog vodonosnika (preuzeto iz Ružičić, 2013) ..	26
Slika 6.1. Profil tla (preuzeto iz Jašaragić – Rako, 2015.) .....	29
Slika 6.2. Volumna gustoća tla po horizontima .....	30
Slika 6.3. Grafički prikaz udjela efektivnih promjera u horizontima tla.....	31
Slika 6.4. Simulacija količine vode po pedološkom profilu tla (0-170 cm) u različitim vremenskim intervalima (T0-0 dan, T1-50 dan, T2-100 dan, T3-150 dan, T4-200 dan, T5-250 dan, T6-300 dan, T7-350 dan, T8-400 dan, T9-450 dan, T10-498 dan) .....	33
Slika 6.5. Koncentracija Cu na dnu pedološkog profila tla (0 – 170 cm) .....	34
Slika 6.6. Koncentracija Pb na dnu pedološkog profila tla (0 – 170 cm).....	34
Slika 6.7. Koncentracija Cd na dnu pedološkog profila tla (0 – 170 cm) .....	35
Slika 6.8. Koncentracija Zn na dnu pedološkog profila tla (0 – 170 cm).....	35
Slika 6.9. Ukupne koncentracije potencijalno toksičnih metala na dnu pedološkog profila tla.....	36

## POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Vrijednosti hidrauličke vodljivosti (Domenico i Schwartz, 1990, preuzeto iz Bačani, 2006) .....	5
Tablica 5.1. Hidraulički parametri tla korišteni u simulaciji modela .....	27
Tablica 5.2. Vrijednosti koeficijenta distribucije .....	28
Tablica 6.1. Udio pojedinih frakcija (%) po horizontima .....	30
Tablica 6.2. Očitane vrijednosti efektivnih promjera zrna .....	31
Tablica 6.3. Izračunate vrijednosti hidrauličke vodljivosti preko empirijskih formula i programa Rosetta - Lite (cm/dan).....	32
Tablica 6.4. Rezultati simulacije potencijalno toksičnih metala .....	33





## 1. UVOD

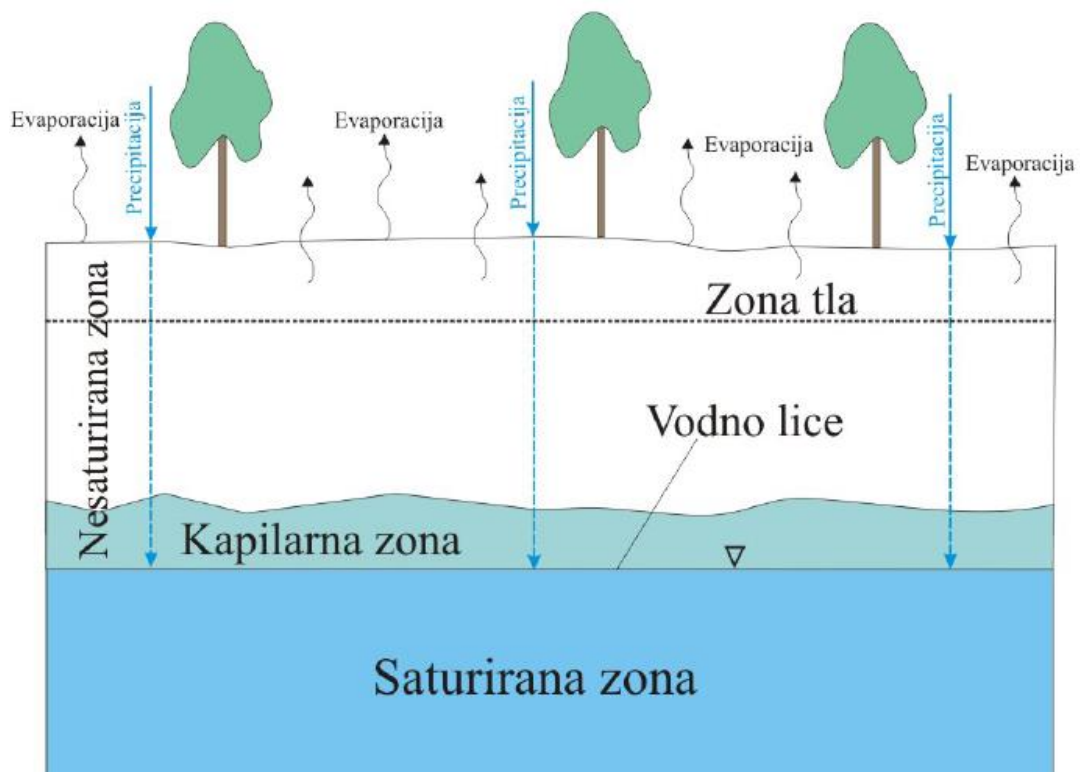
Hidraulička vodljivost ( $K$ ) predstavlja najčešće korišten hidrogeološki parametar u podzemnim vodama. Hidraulička vodljivost je najvažniji parametar toka vode u tlima odnosno sedimentima. Vrijednosti hidrauličke vodljivosti se mogu značajno razlikovati. Najniže vrijednosti pokazuju neraspucale magmatske i metamorfne stijene, dok najviše vrijednosti ima šljunak, okršeni i grebenski vapnenac i propusni bazalt. Za očuvanje vodonosnika i podzemnih voda moraju se dobro poznavati procesi u tlu kako ne bi došlo do akcidentnih situacija. S obzirom na onečišćenje, jedan od najčešćih problema je akumulacija potencijalno toksičnih metala u tlu. Problem onečišćenja kroz tlo može se shvatiti pomoću proučavanja sorpcijskih svojstava tla. Tlo može imobilizirati i na taj način smanjiti migraciju potencijalno toksičnih metala u dublje dijelove tla, odnosno u sam vodonosnik i podzemne vode.

Ciljevi ovog diplomskog rada bili su: empirijsko određivanje hidrauličke vodljivosti i simulacija modela toka vode i transporta potencijalno toksičnih metala pomoću softvera Hydrus 1D. Za ulazne parametre modela toka vode i transporta potencijalno toksičnih metala korišteni su uzorci tla uzeti na lokaciji Stara Loza u okviru diplomskog rada Tea Jašaragića Rake (2015).

## 2. TEORETSKE OSNOVE

### 2.1. Nesaturirana zona

Prostor koji se nalazi između površine tla i vodnog lica ili saturirane zone, zove se *nesaturirana zona* (Slika 2.1) (Tindall i Kunkel, 1998). Tlo u kojem se procjeđivanjem oborina skuplja voda predstavlja gornji dio profila, dok je saturirana zona od nesaturirane zone odvojena *vodnim licem*. Kod kontakta između saturirane i nesaturirane zone dolazi do izdizanja vode do određene visine kao rezultat površinske napetosti tekućine, te sposobnosti vode da vlaži površinu s kojom je u kontaktu. Navedena pojava naziva se *kapilarno dizanje*, a područje u kojem se odvija ova pojava naziva se *kapilarna zona*. Saturirana zona naziva se još i *vodonosnik*, a to je zona u kojoj su sve pore ispunjene vodom (Bačani, 2006). Stupanj saturacije predstavlja omjer volumena vode prema volumenu pora.



Slika 2.1. Nesaturirana i saturirana zona (preuzeto iz Ružičić, 2013)

## 2.2. Darcy-ev zakon

Darcy (1856) je prvi matematičkim postavkama dao objašnjenje kretanja podzemne vode. Tvorac je zakona koji opisuje laminarni gravitacijski tok vode u poroznoj sredini. Dizajnirao je pješčane filtre za pročišćavanje vode, te je eksperimentalno ustanovio da količina vode koja protječe kroz pješčani filter proporcionalna poprečnom presjeku pješčanog filtra i razlici između visine vode na ulazu i izlazu iz filtra, a obrnuto proporcionalna duljini filtra. Stoga Darcy-ev zakon glasi:

$$Q = K * F * \frac{h_1 - h_2}{l} = K * F * i \quad (2 - 1)$$

gdje je:

$Q$  – količina vode koja protječe kroz pješčani filter ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$K$  – faktor proporcionalnosti koji ovisi o propusnosti sloja ( $\text{m/s}$ );

$F$  – površina poprečnog presjeka pješčanog filtra ( $\text{m}^2$ );

$i$  – hidraulički gradijent (bezdimenzijska veličina) predstavlja gubitak mehaničke energije fluida ili pad potencijala na promatranom putu.

Darcy-ev zakon objašnjava da je  $K$  faktor proporcionalnosti, te da ovisi o propusnosti stijene. Također izražava lakoću kojom se voda giba kroz vodonosni sloj, a naziva se *hidraulička vodljivost* ( $\text{m/s}$ ,  $\text{m/dan}$ ,  $\text{cm/s}$ ). Hidraulička vodljivost se definira kao količina vode koja protječe kroz poprečni presjek vodonosne stijene jedinične površine uz jedinični hidraulički gradijent, što podrazumijeva pad potencijala za 1 m na udaljenost od 1 m u smjeru tečenja podzemne vode (Bačani, 2006). Hidraulička vodljivost ovisi o značajkama stijene kroz koju se fluid giba i o značajkama fluida, a međusobna ovisnost navedenih parametara prikazuje se na sljedeći način:

$$K = cd^2 \frac{\rho_v g}{\eta} = k \frac{\rho_v g}{\eta} \quad (2 - 2)$$

gdje je:

$K$  – hidraulička vodljivost ( $\text{m/s}$ );

$c$  – bezdimenzijski koeficijent koji objedinjuje poroznost, zbijenost i oblik zrna;  
 $d$  – promjer pore kroz koju se fluid filtrira (m);  
 $g$  – akceleracija sile teže ( $m/s^2$ );  
 $\rho_v$  – gustoća fluida ( $kg/m^3$ );  
 $\eta$  – dinamički viskozitet fluida ( $kg/ms$ );  
 $k$  – permeabilnost ili propusnost ( $m^2$ ).

Izraz u formuli  $\frac{\rho_v g}{\eta}$  odnosi se na značajke fluida, a  $k = cd^2$  se odnosi na značajke stijene. Hidraulička vodljivost ( $K$ ) kao pojam najčešće se koristi u hidrogeologiji koja se bavi samo podzemnim vodama, dok se pojam propusnost ( $k$ ) više koristi u industriji nafte koja se bavi i vodom i naftom te plinom. Vrijednosti hidrauličke vodljivosti se mogu razlikovati što je prikazano u Tablici 2.1. Vrijednosti koje su najniže pokazuju neraspucale magmatske i metamorfne stijene, dok najviše vrijednosti ima šljunak, okršeni i grebenski vapnenac i propusni bazalt. Gledajući jednu grupu stijena najmanje razlike su kod sedimenata, a najveće razlike su kod kristalinskih stijena. Pri rješavanju praktičnih problema, uzima se da su stijene s hidrauličkom vodljivosti koja je  $\leq 10^{-9}$  m/s nepropusne. S obzirom na tu konstataciju gline, šejlovi, neraspucale magmatske i metamorfne stijene spadaju u nepropusne. Ukoliko su te iste stijene raspucale njihova će hidraulička vodljivost biti za dva do tri reda veličine veća (Bačani, 2006).

**Tablica 2.1. Vrijednosti hidrauličke vodljivosti (Domenico i Schwartz, 1990, preuzeto iz Bačani, 2006)**

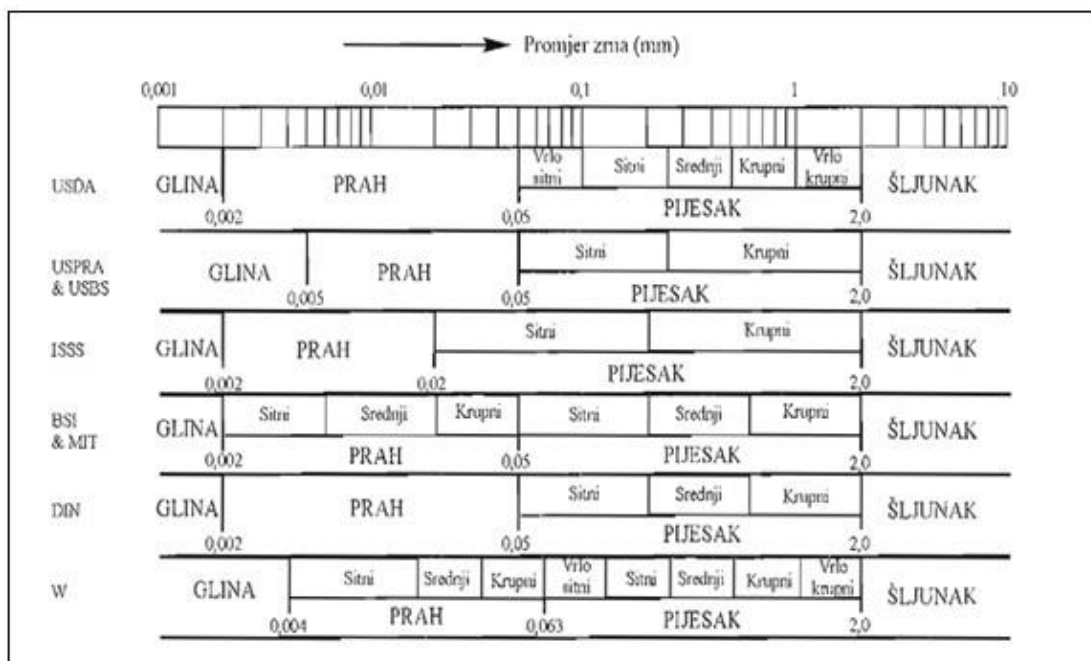
<b>Vrsta stijene</b>	<b>Hidraulička vodljivost K (m/s)</b>
<b>SEDIMENTI:</b>	
Šljunak	$3 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-2}$
Krupnozrnati pijesak	$9 \cdot 10^{-7} - 6 \cdot 10^{-3}$
Srednjezrnati pijesak	$9 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-4}$
Sitnozrnati pijesak	$2 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-4}$
Prah, les	$1 \cdot 10^{-9} - 2 \cdot 10^{-5}$
Glina	$1 \cdot 10^{-11} - 4,7 \cdot 10^{-9}$
<b>SEDIMENTNE STIJENE:</b>	
Okršeni i grebenski vapnenac	$1 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-2}$
Vapnenac, dolomit	$1 \cdot 10^{-9} - 6 \cdot 10^{-6}$
Pješčenjak	$3 \cdot 10^{-10} - 6 \cdot 10^{-6}$
Siltit	$1 \cdot 10^{-11} - 1,4 \cdot 10^{-8}$
Sol	$1 \cdot 10^{-12} - 1 \cdot 10^{-10}$
Anhidrit	$4 \cdot 10^{-13} - 2 \cdot 10^{-8}$
Šepl	$1 \cdot 10^{-13} - 2 \cdot 10^{-9}$
<b>KRISTALINSKE STIJENE:</b>	
Raspucale magmatske i metamorfne stijene	$8 \cdot 10^{-9} - 3 \cdot 10^{-4}$
Neraspucale magmatske i metamorfne stijene	$3 \cdot 10^{-14} - 2 \cdot 10^{-10}$
Rastrošeni granit	$3,3 \cdot 10^{-6} - 5,2 \cdot 10^{-5}$
Rastrošeni gabra	$5,5 \cdot 10^{-7} - 3,8 \cdot 10^{-6}$
Bazalt	$2 \cdot 10^{-11} - 4,2 \cdot 10^{-7}$
Propusni bazalt	$4 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-2}$

Hidraulička vodljivost tla ili nekog sedimenta može se odrediti terenskim i laboratorijskim metodama. Međutim, hidraulička vodljivost se također može odrediti iz empirijskih formula koje koriste rezultate granulometrijskih analiza te pomoću softverskog programa Rosetta–Lite (Schaap et al., 2001). Kod terenskih metoda određivanja hidrauličke vodljivosti nastaju problemi s nedostatka preciznog poznavanja geometrije vodonosnika i hidrauličkih granica,

te su zbog toga točne procjene hidrauličke vodljivosti ograničene. Laboratorijske metode predstavljaju velike probleme u dužini vremena testiranja te u smislu dobivanja reprezentativnih uzoraka, dok metode dobivanja hidrauličke vodljivosti pomoću empirijskih formula i pomoću softvera, a temelje se na distribuciji veličine zrna su najjeftinije i dosta pouzdane metode određivanja hidrauličke vodljivosti.

### 2.3. Fizički parametri tla

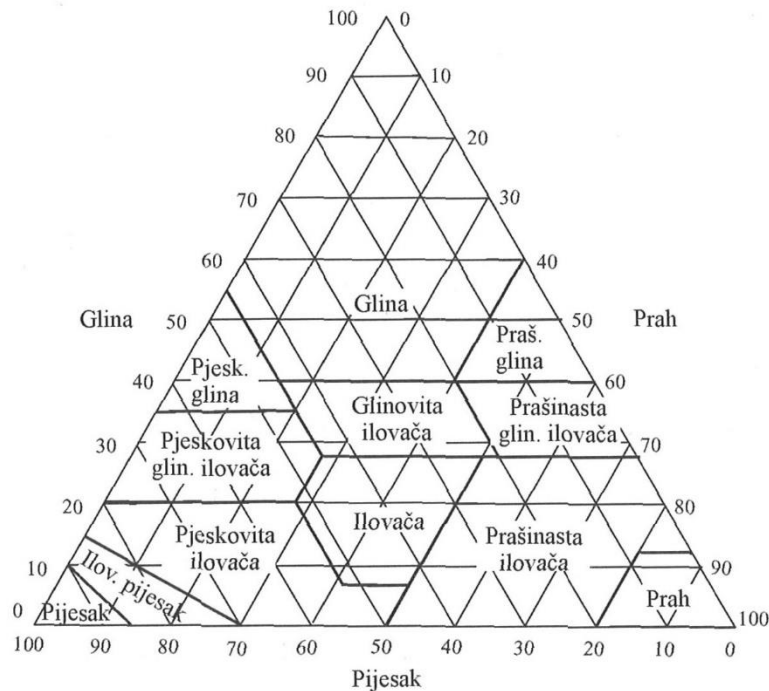
Udio pojedinih čestica u tlu se naziva *tekstura* tla, dok se njihov međusoban odnos naziva *struktura*. Postoje razni čimbenici koji utječu na teksturu tla kao što su: udio organske tvari, količina anorganskih tvari, geneza tla te ljudska aktivnost (Kutilek i Nielsen, 1994). Jedan od ključnih fizičkih parametara je veličina čestice, a postoje razne klasifikacije čestica prema veličini (Slika 2.2). Čestice tla manje od 0,002 mm pripadaju veličini čestica gline od 0,002 – 0,05 mm pripadaju veličini silta, dok čestice dimenzija od 0,05 – 2 mm pripadaju česticama veličine pijeska, a čestice veće od 2 mm pripadaju razredu šljunka te se ne smatraju razredom tla (Radcliffe i Šimůnek, 2010). Navedene veličine pripadaju USDA klasifikacijskoj shemi.



**Slika 2.2. Osnovne konvencionalne sheme klasifikacije nekonsolidiranih sedimenata prema veličini zrna: U. S. Department of Agriculture (USDA); International Soil Science Society (ISSS); U. S. Public Road Administration (USpra); Massachusetts Institute of**

Technology (MIT); British Standard Institute (BSI); Njemački standardi (DIN); Wentworthova skala (Urumović, 2003)

Tlo u većini slučajeva nije sačinjeno od jedne veličine čestica, te je za klasificiranje tla prema teksturi neophodno odrediti granulometrijski sastav (Slika 2.3).



**Slika 2.3. Klasifikacija i nomenklatura sitnozrnatih sedimenata s obzirom na postotak gline, praha i pijeska (Urumović, 2003; prema USDA)**

Čvrsta faza, tekuća faza te plinovita faza su glavni sastojci nesaturiranog tla. Svaka ta faza ima svoju gustoću  $\rho_i$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$  ili  $\text{g}/\text{cm}^3$ ] te zauzima dio frakcije ukupnog volumena  $V$ . Volumna gustoća  $\rho_v$  je omjer mase čvrste faze  $m_\varepsilon$  s ukupnim volumenom tla (Dirksen, 1999). Također se volumna gustoća može dobiti iz umnoška poroznosti i gustoće čvrstih čestica:

$$\rho_v = \frac{m_\varepsilon}{V} = P \times \rho_\varepsilon \left[ \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right] \quad (2-3)$$

gdje je:

$m_\varepsilon$  – masa čvrste faze (g);



$V$  – ukupni volumen uzorka ( $\text{cm}^3$ );

$P$  – poroznost (%);

$\rho_c$  – gustoća čvrste faze ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

Gustoća čvrstih čestica predstavlja omjer mase suhog tla koje su bez pora i volumena čvrstih čestica tla bez zraka, znači ne uključuje pore unutar tla dok volumna gustoća obuhvaća pore unutar tla. Volumna gustoća ovisi o strukturi, teksturi, zbijenosti tla te o sadržaju organske tvari. S porastom dubine raste zbog smanjivanja sadržaja organske tvari i veće zbijenosti tla. Poroznost ( $P$ ) je definirana kao omjer volumena pora i ukupnog volumena tla, a može se promatrati na dva načina. Ukupna poroznost je suma svih šupljina u tlu, neovisno o otvorenosti ili zatvorenosti šupljina odnosno da li su ispunjene vodom ili zrakom (Sraka, 2005). Efektivna poroznost odnosi se na pore koje su međusobno povezane i kroz koje cirkulira voda (Bačani, 2006). Poroznost je ovisna o strukturi, teksturi i sastavu određenog tla. Retencijski kapacitet tla za vodu je količina vode zadržana unutarnjim silama u mikroporama tla, dok su makropore ispunjene zrakom (Sraka, 2005). Dok retencijski kapacitet tla za zrak predstavlja količinu zraka u tlu kada je tlo zasićeno do retencijskog kapaciteta tla za vodu.

Dobiveni udjeli čestica koji su u postotcima, zajedno s vrijednostima volumne gustoće mogu se koristiti za dobivanje hidrauličke vodljivosti, a isto tako i za dobivanje retencijskih parametara u nesaturiranoj zoni.

#### **2.4. Empirijske formule pomoću kojih se određuje hidraulička vodljivost**

Empirijske formule koje se koriste za određivanje hidrauličke vodljivosti temelje se na korištenju podataka o granulometrijskom sastavu porozne sredine. Rezultati granulometrijskih analiza predstavljaju osnovni i jedini ulazni parametar koji se primjenjuje u empirijskim formulama. Primjenjivost formula ovisi o vrsti materijala za koje se hidraulička vodljivost procjenjuje, također je važno i napomenuti da upotreba različitih empirijskih formula na istom poroznom mediju daje različite rezultate hidrauličke vodljivosti.

Opća formula hidrauličke vodljivosti prikazana je sljedećom jednačinom (Vuković i Soro 1992):

$$K = \frac{g}{\nu} * C * f(n) * d_e^2 \quad (2 - 4)$$

gdje je:

$K$  – hidraulička vodljivost (m/s);

$g$  – gravitacijska konstanta (m/s<sup>2</sup>);

$\nu$  – kinematička viskoznost (-);

$C$  – koeficijent sortiranja;

$f(n)$  – funkcija poroznosti;

$d_e$  – efektivni promjer zrna (mm).

Kinematička viskoznost ( $\nu$ ) odnosi se na dinamički viskozitet ( $\mu$ ) i gustoću tekućine ( $\delta$ )

$$\nu = \frac{\mu}{\delta} \quad (2 - 5)$$

$C$ ,  $f(n)$  i  $d_e$  su vrijednosti koje ovise o različitim metodama koje se primjenjuju za analizu veličine zrna. Vuković i Soro (1992) opisali su da se poroznost ( $n$ ) može dobiti iz empirijskog odnosa s koeficijentom jednolikog zrna ( $U$ ):

$$n = 0,255 * (1 + 0,83^U) \quad (2 - 6)$$

gdje je:

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (2 - 7)$$

#### 2.4.1. Alyamani i Sen jednadžba

Jednadžba prema Alyamani i Sen (1993) glasi:

$$K = 1300 * [I_0 + 0,025(d_{50} - d_{10})]^2 \quad (2 - 8)$$

gdje je:

$K$  - hidraulička vodljivost (m/s);

$I_0$  – odsječak na osi x od linije koju tvore  $d_{50}$  i  $d_{10}$  (mm);

$d_{10}$  – efektivni promjer zrna (promjer u uzorku od kojeg 10 % zrna ima manji promjer);

$d_{50}$  – medijan ili srednja veličina zrna ( $M_d$ ) je ona veličina na kumulativnoj granulometrijskoj krivulji od koje postoji u sastavu uzorka 50 % većih i 50 % manjih zrna.

#### 2.4.2. Beyer jednadžba

Jednadžba prema Beyer (1966) je:

$$K = \frac{g}{\nu} * 6 * 10^{-4} * \log \frac{500}{U} * d_{10}^2 \quad (2 - 9)$$

gdje je:

$K$  – hidraulička vodljivost (m/s);

$g$  – gravitacijska konstanta  $\sim 9,81$  (m/s<sup>2</sup>);

$\nu$  – kinematička viskoznost (-);

$U$  – koeficijent jednolikosti zrna;

$d_{10}$  – efektivni promjer zrna (mm) tj. promjer u uzorku od kojeg 10 % zrna ima manji promjer.

Ova formula se smatra jako korisnom za materijale s heterogenom distribucijom i slabo sortiranim zrnima s koeficijentom jednolikosti između 1 i 20 te efektivnim promjerom zrna između 0,06 i 0,6 mm. Beyer-ova jednadžba ne uzima u obzir poroznost i stoga funkcija poroznosti poprima vrijednost 1 (Odong, 2007).

#### 2.4.3. Hazen jednadžba

Jednadžba prema Hazen (1892) glasi:

$$K = \frac{g}{\nu} * 6 * 10^{-4} * [1 + 10(n - 0,26)] * d_{10}^2 \quad (2 - 10)$$

gdje je:

$K$  – hidraulička vodljivost (m/s);

$g$  – gravitacijska konstanta  $\sim 9,81$  (m/s<sup>2</sup>);

$\nu$  – kinematička viskoznost (m<sup>2</sup>/s);

$n$  – poroznost;

$d_{10}$  – efektivni promjer zrna (mm) tj. promjer u uzorku od kojeg 10 % zrna ima manji promjer.

Hazen-ova formula se koristi za određivanje hidrauličke vodljivosti od pijeska do šljunka, uz uvjet da tlo ili sediment ima koeficijent jednolikosti ( $U$ ) manji od 5, te efektivni promjer zrna ( $d_{10}$ ) između 0,1 i 3 mm. Međutim prvotno je formula razvijena za određivanje hidrauličke vodljivosti jednoliko graduiranih pijesaka (Odong, 2007).

#### 2.4.4. Kozeny – Carman jednadžba

Jednadžba prema Kozeny-Carman (1956) glasi:

$$K = \frac{g}{\nu} * 8,3 * 10^{-3} * \left[ \frac{n^2}{(1-n)^2} \right] * d_{10}^2 \quad (2 - 11)$$

gdje je:

$K$  – hidraulička vodljivost (m/s);

$g$  – gravitacijska konstanta  $\sim 9,81$  (m/s<sup>2</sup>);

$\nu$  – kinematička viskoznost (-);

$n$  – poroznost;

$d_{10}$  – efektivni promjer zrna (mm) tj. promjer u uzorku od kojeg 10 % zrna ima manji promjer.

Jednadžba Kozeny-Carman je najšire prihvaćena jednadžba koju je prvotno predložio Kozeny (1927), kasnije ju je modificirao Carman (1956). Jednadžba nije primjerena za materijale s efektivnom veličinom zrna većom od 3 mm ili za glinasta tla.

#### 2.4.5. Slichter jednadžba

Jednadžba prema Slichter-u (1989) glasi:

$$K = \frac{g}{\nu} * 1 * 10^{-2} * n^{3,287} * d_{10}^2 \quad (2 - 12)$$

gdje je:

$K$  – hidraulička vodljivost (m/s);

$g$  – gravitacijska konstanta  $\sim 9,81$  (m/s<sup>2</sup>);

$\nu$  – kinematička viskoznost (m<sup>2</sup>/s);

$n$  – poroznost;

$d_{10}$  – efektivni promjer zrna (mm) tj. promjer u uzorku od kojeg 10 % zrna ima manji promjer.

Slichter-ova (1989) jednadžba koristi se najviše za zrna promjera između 0,01 i 5 mm, te se podrazumijeva korištenje efektivnog promjera zrna  $d_{10}$  čija je primjena zadnjih godina naročito raširena (Carlson, 2007; Cheng i Chen, 2007; Odong, 2007; Vuković i Soro 1991, 1992).

#### 2.4.6. Terzaghi jednadžba

Jednadžba prema Terzaghi-ju (1964) glasi:

$$K = \frac{g}{\nu} * C_t * \left(\frac{n-0,13}{\sqrt[3]{1-n}}\right)^2 * d_{10}^2 \quad (2 - 13)$$

gdje je:

$K$  – hidraulička vodljivost (m/s);

$g$  – gravitacijska konstanta  $\sim 9,81$  (m/s<sup>2</sup>);

$n$  – poroznost;

$d_{10}$  – efektivni promjer zrna (mm) tj. promjer u uzorku od kojeg 10 % zrna ima manji promjer;

$Ct$  = koeficijent sortiranja, a on je između  $6.1 * 10^{-3} < Ct < 10.7 * 10^{-3}$ .

Jednadžba prema Terzaghi-ju je najbolja za pijeske velikih zrna (Cheng i Chen, 2007).

#### 2.4.7. USBR jednadžba

Jednadžba prema USBR (1981) glasi:

$$K = \frac{g}{\nu} * 4,8 * 10^{-4} * d_{20}^{0,3} * d_{20}^2 \quad (2 - 14)$$

gdje je:

$K$  – hidraulička vodljivost (m/s);

$g$  – gravitacijska konstanta  $\sim 9,81$  (m/s<sup>2</sup>);

$\nu$  – kinematička viskoznost (-);

$d_{20}$  – efektivni promjer zrna (mm) tj. promjer u uzorku od kojeg 20 % zrna ima manji promjer.

Jednadžba prema USBR se koristi najviše za pijeske srednje veličine zrna s koeficijentom jednolikosti manjim od 5, te ne ovisi o poroznosti (Odong, 2007).

#### 2.4.8. ROSSETA-LITE program

Rosetta-Lite je besplatan softverski program koji koristi pedotransferne funkcije za procjenu i računanje hidrauličke vodljivosti ( $K_s$ ) (Schaap et al., 2001). Za izračun  $K_s$  potrebni su osnovni podaci o udjelu pijeska, praha i gline u tlu dobiveni granulometrijskom analizom te volumna gustoća tla. Volumna gustoća tla ima poseban značaj na utjecaj saturiranosti tla i hidrauličku vodljivost s obzirom da odražava strukturu tla i distribuciju pora u tlu (Saxton i Rawls, 2006). Prema izrazu saturirana hidraulička vodljivost ( $K_s$ ) (Bear, 1972) je:

$$K_s = \frac{k\rho_1g}{\eta} \quad (2 - 15)$$

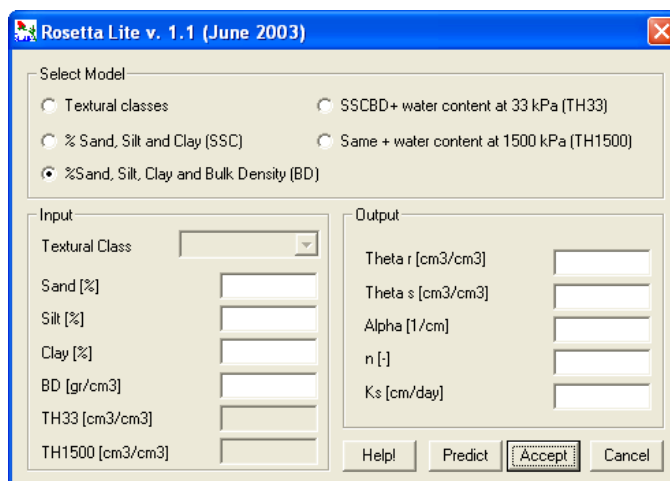
gdje je:

$k$  – unutarnja propusnost ( $m^2$ );

$\rho_1$  – gustoća fluida ( $g/cm^3$ );

$\eta$  – koeficijent dinamičke viskoznosti fluida (Pa s).

Radcliffe i Šimunek (2010) ističu da pedotransferne funkcije mogu prouzročiti velika odstupanja stvarnih i predviđenih vrijednosti, a to sve ovisi o tome koliko se ulaznih podataka koristi. Dodavanjem ulaznih parametara kao što su udio organske tvari, poroznost tla, te struktura tla mogu znatno pridonijeti dobivanju boljeg pedotransfernog modela, a isto tako poboljšati točnost  $K_s$  (Slika 2.4).



Slika 2.4. Izgled programu Rosetta Lite

## 2.5. Modeliranje

Pojednostavljena verzija nekog fizičkog sustava koji bi bio prekomplikiran za analizirati uzvši u obzir sve njegove dijelove nazivamo *model* (Young i Freedman, 2000). Ukoliko je riječ o modeliranju nesaturirane zone koja čini jedan jako složen hidrogeološki sustav potrebno je napraviti model koji će zadržati jednostavnost, ali isto tako opisati sve značajne parametre. Tri glavne vrste modela su konceptualni, fizički i analogni te matematički modeli

(van Dijk, 2003). Također modele možemo podijeliti i s obzirom na predmet istraživanja: model toka, model transporta ili pronosa tvari, model transporta topline i model deformacije.

### **2.5.1. Konceptualni model**

Konceptualni model je opisni model nekog sustava utemeljen na kvalitativnim pretpostavkama o njegovim dijelovima (elementima), vezama između tih dijelova i granicama sustava (Ružičić et al., 2012). Kreiranjem konceptualnog modela u nesaturiranoj zoni treba se definirati geometrija sustava nesaturirane zone, hidraulički uvjeti na granicama tlo - voda, sredina preko hidrogeoloških i fizičkih parametara tla te ponašanje okoline.

### **2.5.2. Fizički i analogni modeli**

Fizički i analogni modeli predstavljaju modele koji se izvode u kontroliranim odnosno laboratorijskim uvjetima pri čemu se kontroliraju razni faktori koje utječu na sami model. Fizički i analogni modeli su prikaz nekog velikog sustava u malom (Bačani i Posavec, 2011). Primjer je Darcy-eva aparatura u kojoj se proučava filtracija vode kroz pijesak (Darcy, 1856).

### **2.5.3. Matematički modeli**

Matematičke modele primjenjujemo u slučaju kada je određeni sustav teško opisati riječima što pokazuje njegovu kompleksnost. Uporabom jednostavnih matematičkih jednadžbi, zamjene se takvi složeni opisi. Ukoliko postoji model toka podzemne vode potrebno je definirati ograničenje na granicama sustava kao i unutar sustava. Ta ograničenja su zapravo početni i granični uvjeti opisani pomoću matematičkih jednadžbi. Metode kojima se rješava model mogu biti analitičke, numeričke i stohastičke.

### **2.5.4. HYDRUS 1D – numerički model toka vode i transporta onečišćenja**

Numerički model HYDRUS 1D korišten je za simulaciju toka vode i transporta onečišćenja, a prolazan tok vode u nesaturiranoj zoni bazira se na Richards-ovoj jednadžbi (Richards, 1931):



$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S \quad (2-16)$$

gdje je:

$z$  – vertikalna koordinata pozitivna prema gore od vodnog lica (m);

$t$  – vrijeme (s);

$h$  – matični potencijal tla (m);

$\theta$  – sadržaj vode ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

$S$  – voda uzeta korijenjem (1/s).

$K(h)$  – funkcija nesaturirane hidrauličke vodljivosti (najčešće prikazana kao produkt relativne hidrauličke vodljivosti  $K_r$  koja je bezdimenzionalna i saturirane hidrauličke vodljivosti  $K_s$  (cm/s).

Richars-ova jednačba je nelinearna parcijalna diferencijalna jednačba, te zbog izrazite nelinearnosti ova se jednačba najčešće rješava numerički. Koeficijent  $K(h)$  koji množi gradijent je funkcija zavisnih varijabli  $h$  ili  $\theta$ .

Van Genuchten-Mualemov (1980) model opisuje hidraulički parametar tla prema jednačbi:

$$\theta(h) = \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + |\alpha h|^n]^m} + \theta_r (h < 0) \quad (2-17)$$

gdje je:

$\theta(h)$  – količina vode u tlu ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

$\theta_r$  – rezidualna količina vode u tlu;

$\theta_s$  – količina vode u tlu u uvjetima potpune saturacije ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

$\alpha$  – inverzna vrijednost pora ispunjenih zrakom (1/cm);

$n$  – indeks raspodjele veličine pora;

$m$  – koeficijent optimizacije.

Za modeliranje toka vode od hidrauličkih parametara korištene su vrijednosti volumne gustoće, granulometrijskog sastava, hidraulička vodljivost i kapacitet vode tla.

Jednadžbom advekcije, disperzije i sorpcije riješen je transport onečišćenja sljedećom jednadžbom:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\rho_b \partial s}{\theta \partial t} = D_e \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - v \frac{\partial c}{\partial z} \quad (2-18)$$

gdje je:

$\rho_b$  – volumna gustoća ( $\text{g/cm}^3$ );

$s$  – sorbirana koncentracija ( $\text{mg/g}$ );

$c$  – koncentracija otopine ( $\text{mg/l}$ );

$D_e$  – koeficijent disperzije.

Ukoliko se sorpcija pojavljuje kao linearna jednadžba, a može biti i nelinearna, tada jednadžba glasi:

$$R \frac{\partial c}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - v \frac{\partial c}{\partial z} \quad (2-19)$$

gdje je:

$R$  – retencijski faktor koji glasi:

$$R = 1 + \frac{\rho_b K_d}{\theta} \quad (2-20)$$

gdje je:

$K_d$  – koeficijent distribucije ( $\text{l/g}$ ).

Koeficijent distribucije pokazuje omjer koncentracije iona koji je sorbiran na čvrstu fazu i koncentracije iona koji je u otopini, a izračunava se pomoću izoterme. Kod linearne izoterme jednadžba sorpcije glasi:

$$s = K_d C \quad (2 - 21)$$

Za opisivanje nelinearne sorpcijske izoterme najčešće se koristi Freundlich-ova jednadžba (1909) koja glasi:

$$s = K_f C^a \quad (2 - 22)$$

gdje je:

$K_f$  – Freundlich-ov distribucijski koeficijent;

$a$  – eksponent dobiven iz izotermi određenog tla.

Ukoliko je  $a=1$  tada izoterma poprima linearan oblik, a ukoliko  $a$  pada tada izoterma postaje zakrivljena.

Postoji još i Langmuir-ova (1917) izoterma koja se prikazuje sljedećom jednadžbom:

$$s = \frac{K_d C}{1 + \eta C} \quad (2 - 23)$$

gdje su:

$K_d$  i  $\eta$  - Langmuir-ove konstante

Za modeliranje transporta potencijalno toksičnih metala korištene su vrijednosti volumne gustoće, longitudinalna disperzivnost i koeficijenti distribucije.

Koristeći Galerkinov tip linearne metode konačnih elemenata (Ern i Guermond, 2004) HYDRUS 1D rješava prostornu diskretizaciju na numerički način, dok su vremenske derivacije riješene Crank-Nicolsonovom shemom (Crank i Nicolson, 1947).

### 3. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Grad Zagreb i zagrebački vodonosnik bili su predmet brojnih istraživanja onečišćenja tla i sedimenata s elementima u tragovima (Namjesnik et al., 1992; Namjesnik 1994; Durn et al., 1999; Romić, 2002; Romić i Romić, 1998, 2003; Romić et al., 2004; Sollitto et al., 2010). Jedan od istraživačkih projekata bila je izrada geokemijske karte čije je prvenstveni cilj bio detektirati problem onečišćenja na regionalnoj razini (Halamić i Miko, 2009). Istraživanje je trajalo nekih 10- ak godina te je bilo prikupljeno oko 640 uzoraka površinskog sloja na mreži od 5 km u središnjoj Hrvatskoj. Halamić i Miko (2009) su utvrdili da svi metali osim žive pokazuju povećane vrijednosti od MDK koje su definirane Pravilnikom o zaštiti poljoprivrednog zemljišta od onečišćenja (N.N. 9/14).

Sollitto et al. (2010) sustavno su uzorkovali površinski sloj na mreži od 2 km dok su u blizini grada Zagreba progustili mrežu uzorkovanja na 1 km te prikupili 916 uzorka tla. Istraživanje je pokazalo povećane vrijednosti MDK za kadmij, krom, nikal, olovo i cink propisane Pravilnikom o zaštiti poljoprivrednog zemljišta od onečišćenja (N.N. 9/14).

Istraživanja o modeliranju toka vode u tlu na području Hrvatske nisu zastupljena u velikom broju. Ružičić (2013) u doktorskoj disertaciji na području vodocrpilišta Kosnica izrađuje model toka vode i transporta potencijalno toksičnih elemenata olova, cinka i kadmija uz korištenje HYDRUS 1D softvera. Osim navedenog napravljen je sorpcijski eksperiment prilikom kojeg su kreirane izoterme za spomenute elemente. Površinski horizonti koji imaju najveći CEC imaju i najbolja sorpcijska svojstva.

Marić (2014) u svom diplomskom radu izrađuje sorpcijski eksperiment koristeći otopinu bakrovog (II) sulfata (modra galica). Rezultati eksperimenta pokazala su da površinski horizonti imaju najbolja svojstva sorpcije dok se povećanjem dubine vrijednosti sorpcije smanjuju.

Marković (2007) određuje osjetljivost nesaturirane zone na području Varaždinskog vodonosnika geokemijskim modeliranjem - transporta nitrata. Izrada modela transporta zahtjeva prvotno izradu modela toka vode pomoću Richards-ove jednadžbe u kojem su simulirani promjenjivi hidrološki uvjeti (s i bez oborina, evapotranspiracija). Transport onečišćivala i model toka izrađen je pomoću računalnih programa VS2DT i PHREEQC.

Filipović (2012) je izradio na području Biđ polja numerički model toka vode u hidromorfnim tlima s naglaskom na nesaturiranu zonu. Računalni program HYDRUS 1D koristio je za izradu modela toka vode. Simulacije tečenja vode u profilu istraživnog područja pokazale su veće procjeđivanje vode na početku i na kraju svake godine istraživanja i u uvjetima kada je površina tla bila bez poljoprivrednih kultura.

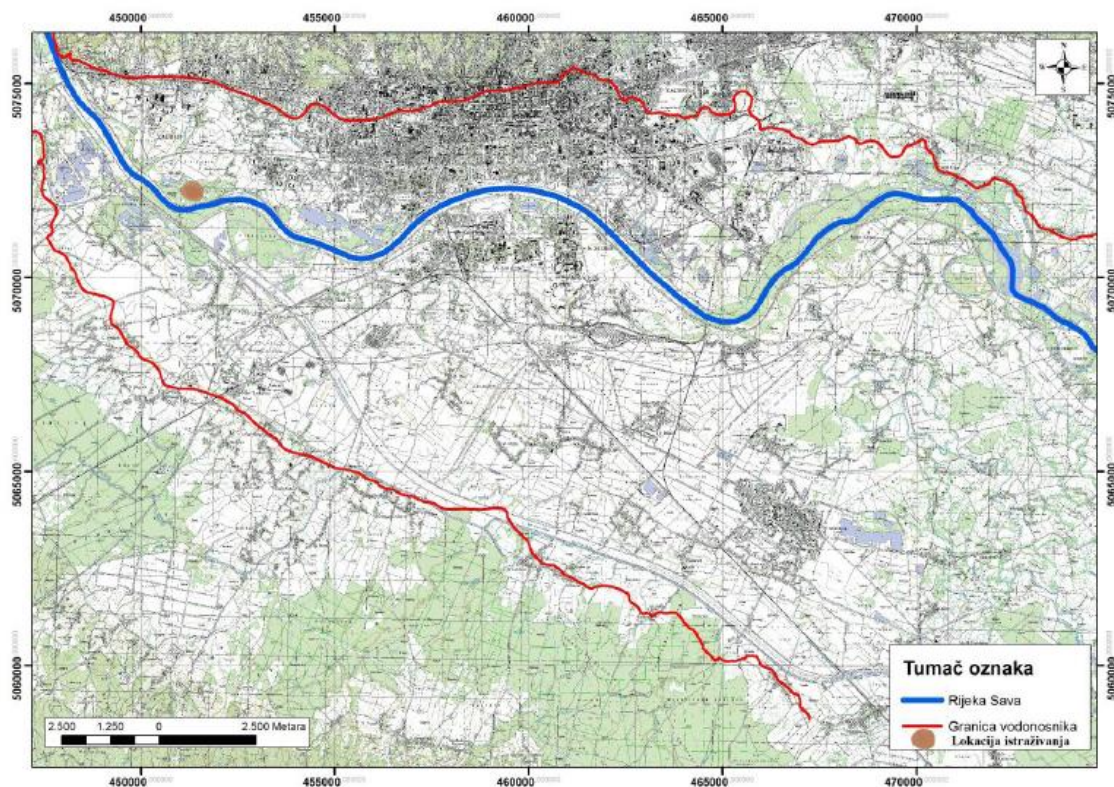
Jašaragić – Rako (2015) u svom diplomskom radu je istraživao sorpciju potencijalno toksičnih metala  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  na aluvijalnom tlu u blizini vodocrpilišta Stara Loza. Sorpcijski eksperiment provodio je na porušenim uzorcima tla koristeći multi elementarnu otopinu nitrata bakra, olova, kadmija i cinka. Na temelju rezultata utvrdio je linearne sorpcijske izoterme za sve horizonte iz kojih su se odredili Freundlich – ovi distribucijski koeficijenti (utvrđen je niz  $\text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Zn}$ ). Usporedio je sorpcije elemenata kroz profil tla, te je utvrdio da se olovo najbolje sorbira na tlo te da se sa povećanjem dubine sorpcija smanjuje.

## 4. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA

### 4.1. Geografija područja istraživanja

Područje grada Zagreba obuhvaća veliku aluvijalnu ravnicu koja se pruža sjeverozapad-jugoistok. Na sjeveru graniči sa Medvednicom, a na sjeverozapadu sa Žumberačkom gorom. Regiju karakterizira velika raznolikost u litologiji, pedologiji i općenito korištenju zemljišta. Sjever i sjeverozapad planinskog je karaktera s brdovitim terenom prosječne nadmorske visine od 100 do 1000 m.n.m. Zapad i jugozapad karakteriziraju terasni ravnjaci s blagim padinama, a nadmorska visina varira od 150 do 250 m.n.m. (Sollitto et al., 2010).

Vodonosnik grada Zagreba nalazi se većinom „ispod“ samoga grada, zbog čega postoji konstantna opasnost od unosa onečišćivala u vodonosnik. Rubne granice vodonosnika čine nepropusna granica na sjeveru, granica dotjecanja na zapadu, jugu i granica otjecanja na istoku. Gledajući geografski, sjeverna granica se poklapa sa izdizanjem Medvednice, dok na zapadu i jugu granica prati izdizanje Žumberačkog gorja i Vukomeričkih gorica. S obzirom da je vodonosnik nastao tokom i meandriranjem rijeke Save, ona ga prati i dalje svom svojom dužinom. Lokacija uzorkovanja tla nalazi se na istočnom djelu grada Zagreba, a koordinate uzorkovanja su X:5568734, Y:5072217. Područje se nalazi u trećoj zoni sanitarne zaštite crpilišta Stara Loza. Na 650 m od lokacije uzorkovanja nalazi se lijeva obala rijeke Save (Slika 4.1.).

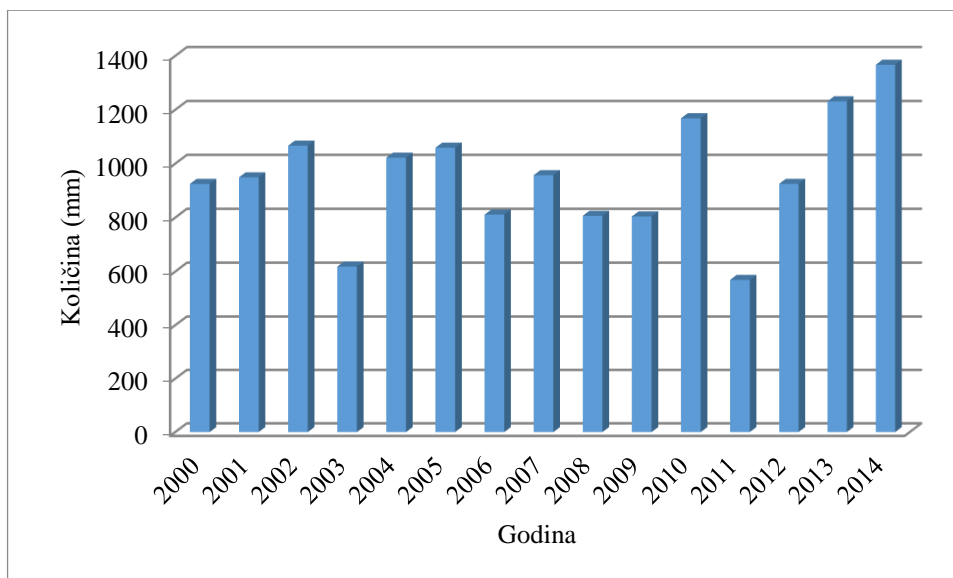


**Slika 4.1. Geografska karta zagrebačkog područja s granicama vodonosnika i lokacijom uzorkovanja (preuzeto iz Jašaragić-Rako, 2015)**

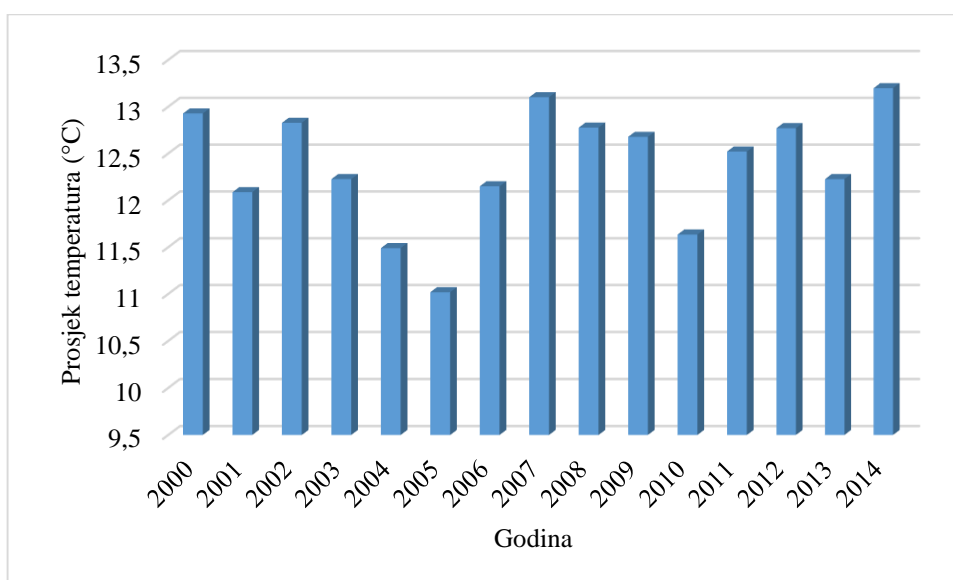
## **4.2. Klimatske značajke**

Klima grada Zagreba klasificirana je kao umjereno kontinentalna, ljeta su vruća i suha s prosječnim temperaturama od 20 °C, dok su zime hladne s prosječnim temperaturama od 1 °C. Srednja godišnja količina padalina na mjernoj postaji Botinec izračunata na osnovi četrnaestogodišnjeg mjerenja od 2000. – 2014 godine iznosi 952,3 mm (Slika 4.2). Dok godišnji prosjek na cijelom području grada Zagreba iznosi 928 mm (izvor podataka: Državni hidrometeorološki Zavod). Prosječna temperatura za četrnaestogodišnje mjerenje na mjernoj postaji Botinec je 12,4 °C (Slika 4.3). U ovom radu obrađeni su podaci mjerne postaje Botinec u periodu od 2012. – 2014, jer su se oni koristili kao ulazni parametri prilikom modeliranja toka vode u nesaturiranoj zoni.

Srednja godišnja količina padalina u periodu od 2012. – 2014. je 1174,8 mm. Dok je prosječna temperatura za period od 2012. – 2014. u iznosu od 12,7 °C.



**Slika 4.2. Oborine mjerene na mjernoj postaji Botinec**



**Slika 4.3. Temperatura izmjerena na mjernoj postaji Botinec**

Ukupno isparavanje s promatranog područja zove se *evapotranspiracija*, a obuhvaća isparavanje s vodene površine, površine tla i transpiraciju biljaka (Bačani, 2006). Stvarna evapotranspiracija je ona koja se događa u realnom vremenu. Za izračunavanje srednje godišnje stvarne evapotranspiracije koristi se Turc-ova (1953) jednadžba:

$$E_t = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (4 - 1)$$



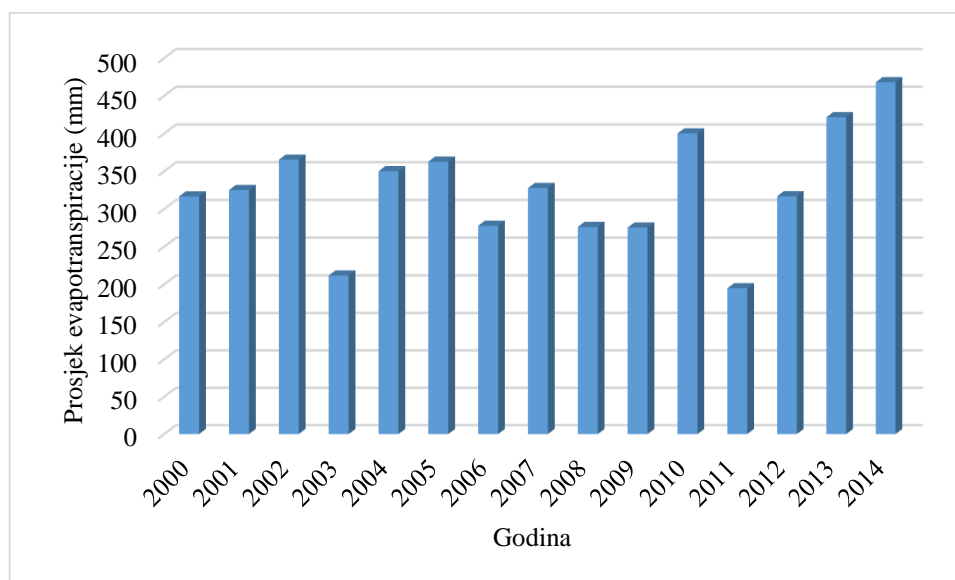
gdje je:

$P$  - visina srednjih godišnjih oborina (mm)

$$L = 300 + 25T + 0,5T^3$$

$T$  - srednja godišnja temperatura zraka ( $^{\circ}\text{C}$ )

Prikaz izračunate srednje godišnje vrijednosti evapotranspiracijetemelji se na izmjerenim podacima oborina i temperature mjerne postaje Botinec u razdoblju od 03.01.2012. – 29.12.2014. Prema gore navedenoj jednadžbi izračunato je da evapotranspiracija za područje Stare Loze iznosi 34,2 %. Na Slici 4.4 je prikazana evapotranspiracija za četrnaestogodišnje razdoblje.



**Slika 4.4. Prikaz evapotranspiracije na mjernoj postaji Botinec**

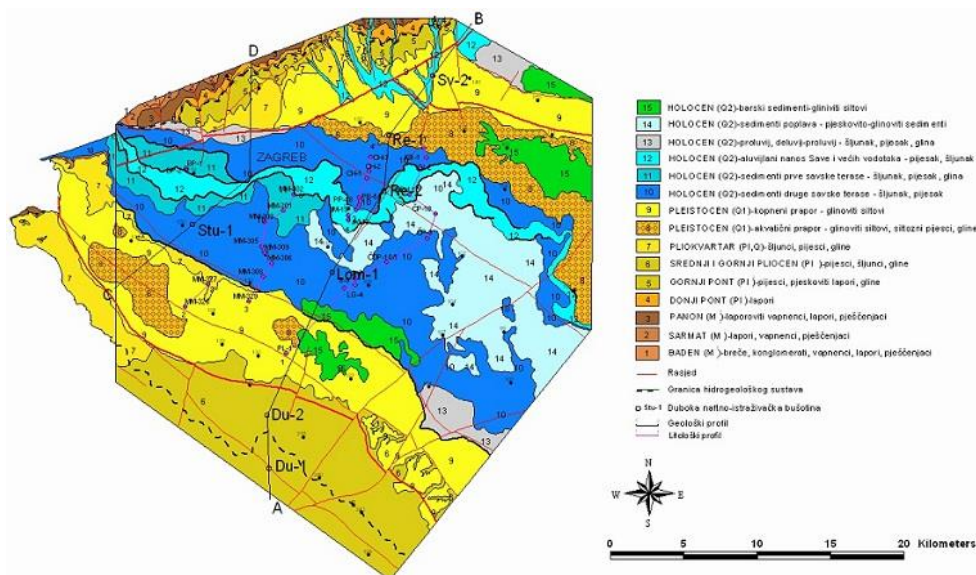
### 4.3. Geologija istraživanog područja

Velić i Durn (1993) istraživano područje karakteriziraju kao nekonsolidirane kvartarne sedimente (pijesci, šljunci, prahovi/prahovite gline) koji su taloženi tijekom pleistocena i holocena (Slika 4.5.)

Prahovi/prahovite gline donjopleistocenske su starosti u kojima se ponegdje pojavljuju leće šljunka koji je donesen najčešće bujičnim tokom. Na zagrebačkom području tijekom srednjeg i gornjeg pleistocena prevladavaju jezerski i močvarni uvjeti prilikom kojih dolazi

do taloženja pijeska. Na pijescima se taloži siltozni i glinoviti materijal koji prelazi u gornjopleistocensku izmjenu šljunka, pijeska, siltova i glina. Početkom holocena dolazi do prodora rijeke Save u ovaj taložni prostor koja sa sobom nosi materijale s Alpa, a sam prodor uvjetovan je tektonskom aktivnošću.

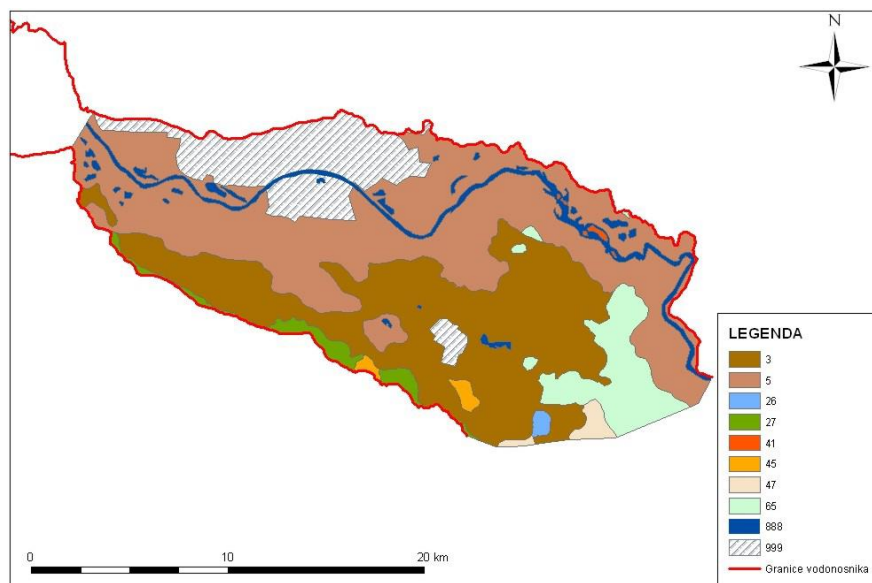
Proluvijalni, aluvijalni te jezersko-barski litofacijes su izdvojeni i determinirani litološkom analizom. Proluvijalni litofacijes karakteriziran izmjenom šljunka i glina dok aluvijani facijes karakteriziraju šljunci s pijescima nastali meandriranjem toka rijeke Save. Jezersko-barskom facijesu pripadaju široko rasprostranjeni klastični sedimenti s čestom pojavom prahovito-glinovitih sedimenata i treseta, koji u svojim dubljim dijelovima imaju leće šljunka s manjim ili većim udjelom gline. (Blašković i Dragičević, 1989).



Slika 4.5. Geološka karta Grada Zagreba i Zagrebačke županije (prezeto iz Bačani i Šparica, 2001)

#### 4.4. Pedologija istraživanog područja

Na području zagrebačkog vodonosnika pojavljuje se 8 jedinica tla prema "Pedološkoj karti Republike Hrvatske mjerila 1:300.000" (Bogunović et al., 1996) (Slika 4.6), a prevladavaju tri jedinice: aluvijalno (3), močvarno-glejno (5) i euterično smeđe tlo (65).



**Slika 4.6. Isječak pedološke karte unutar zagrebačkog vodonosnika (preuzeto iz Ružičić, 2013)**

Istražna lokacija Stara Loza nalazi se unutar aluvijalnog tla koje je nastalo u uvjetima specifičnih pedogenetskih čimbenika, pri čemu dominantnu ulogu ima reljef, matični supstrat te vegetacijski pokrov. Takvo tlo spada u tla s povremenim (zona 0,75-1 m) ili stalnim vlaženjem dijela profila ili cijelog soluma, tj. u razred semiglejnih hidromorfnih tala. Takva tla karakteristična su za bivše poplavne terene ili za njihove povišene dijelove koji su često bili plavljeni tijekom ranijih razdoblja pri čemu je učestalo taloženje čestica sprečavalo razvoj tla odnosno formiranje humusnog horizonta (Husnjak, 2014). Podzemna voda koja je povezana s razinom vode u rijekama sezonskog je karaktera te ima dosta veliko kolebanje koje iznosi između 1 i 3 m. Ovo tlo ima veliki proizvodni potencijal za poljoprivredu zbog svojih fizikalnih i kemijskih svojstva (Husnjak, 2014).

## 5. METODOLOGIJA

U ovom radu korišteni su podaci laboratorijskih mjerenja teksture i volumne gustoće tla i sorpcijskog eksperimenta iz rada Jašaragić – Rako (2015): „Sorpcija potencijalno toksičnih elemenata u tlu“. Teksturni podaci korišteni su u svrhu izračuna hidrauličke vodljivosti empirijskim metodama prema različitim autorima. Podaci dobiveni iz empirijskih metoda i volumna gustoća korišteni su za modeliranje toka vode u programu HYDRUS 1D na lokaciji Stara Loza. Rezultati sorpcijskog eksperimenta korišteni su kao ulazni podaci za model transporta potencijalno toksičnih metala pomoći HYDRUS 1D modela na istoj lokaciji. Detaljnije o postavkama modela će biti opisano u sljedećem potpoglavlju.

### 5.1. Postavke modela toka vode i transporta potencijalno toksičnih metala

Model toka vode i transporta onečišćenja simulira kretanje vode potencijalno toksičnih metala kroz profil tla. Dubina profila tla iznosi 170 cm s ukupno 6 horizonata tla. Ukupno vrijeme simulacije iznosi 498 dana u periodu od 03.01.2012. do 29.12.2014. Za proračun hidrauličkih parametara korištene su empirijske formule i program Rosetta - Lite (Schapp et al., 2001). Ulazni parametri koji su korišteni za dobivanje  $K_s$  pomoću Rosetta – Lite programa prikazani su u Tablici 5.1.

**Tablica 5.1. Hidraulički parametri tla korišteni u simulaciji modela**

Horizonti tla	Dubina(cm)	$Q_r$	$Q_s$	Alpha (1/cm)	n(-)	$K_s$ (cm/dan)	l(-)
A	0-20	0,054	0,4926	0,0065	1,6715	35,94	0,5
IC	20-50	0,0624	0,4743	0,0061	1,66	24,75	0,5
IIC	50-80	0,0986	0,4959	0,0105	1,4464	11,84	0,5
IIIC	80-100	0,0729	0,4381	0,0053	1,6192	13,65	0,5
IVC	100-140	0,0606	0,4145	0,0052	1,6255	19,61	0,5
Gso	140-170	0,0476	0,389	0,0192	1,4187	25,08	0,5

Granični uvjeti za tok vode su postavljeni na sljedeći način: na dnu profila postavljen je granični uvjet slobodne odvodnje odnosno drenaže (engl. *free drainage*). Na površini su postavljeni atmosferski uvjeti koji uključuju površinsko otjecanje (engl. *atmospheric BC with surface run off*). Za meteorološke podatke korištene su količine oborina i

evapotranspiracija za promatrano razdoblje u periodu od 03.01.2012. do 29.12.2014. sa mjerne postaje Botinec. Kao početni uvjet u profilu postavljen je matični potencijal tla koji odgovara tlaku od (engl. *constant pressure head*) 100 cm, a označava početak zone djelomične saturacije. Točka opažanja kod modela postavljena je na dubini od 170 cm, odnosno na samom dnu zadanog profila. Za simulaciju transporta potencijalno toksičnih metala korišteni su koeficijenti distribucije dobiveni iz grafa izoterma za Cu, Pb, Cd i Zn (podaci preuzeti od Jašaragić – Rako, 2015). Korištene vrijednosti prikazane su u Tablici 5.2. Vrijednosti longitudinalne disperzivnosti su 1 cm prema Radcliffe i Šimůnek (2010) s obzirom na tip tla opisan u ovom radu.

**Tablica 5.2. Vrijednosti koeficijenta distribucije**

Horizont tla	Dubina (cm)	Cu	Pb	Cd	Zn
A	0-20	0,0263	0,0266	0,0222	0,0222
IC	20-50	0,0284	0,0282	0,0236	0,0227
IIC	50-80	0,0281	0,0281	0,0218	0,0206
IIIC	80-100	0,027	0,027	0,0219	0,0158
IVC	100-140	0,0266	0,027	0,0215	0,0142
Gso	140-170	0,0263	0,0265	0,0208	0,0133

Kod primjene programa HYDRUS-1D, rubne granice modela (nepropusno/procjeđivanje) simulirane su Cauchyjevim tipom graničnih uvjeta, a donja granica simulirana je kao nepropusna (engl. *zero concentration gradient*), dok je gornja granica postavljena kao procjedna (engl. *Concentration flux*). Početne vrijednosti potencijalno toksičnih elemenata postavljene su 1 mg/cm<sup>3</sup> odnosno 1000 mg/l na površini tla. Točka opažanja postavljena je na dno profila na dubini od 170 cm, a navedene vrijednosti korištene su s obzirom na scenarij izlivanja potencijalno toksičnih elemenata na tlo istraživane lokacije.

## 6. REZULTATI

### 6.1. Opis profila tla

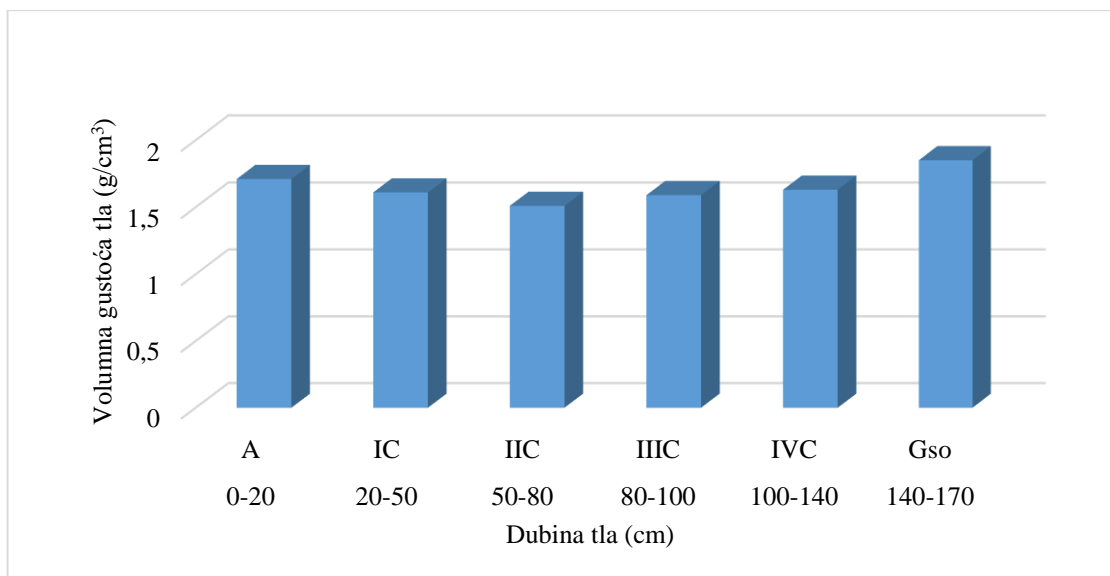
Horizonti tla determinirani su na temelju teksture opipom te djelovanjem 2%-tne HCl prilikom terenskih istraživanja. Tako je površinski O horizont sačinjen od suhog raslinja, a nalazi se na dubini od 0-2 cm. Na dubini od 2-20 cm nalazi se horizont A čija je tekstura praškasta, a struktura granularna. Sljedeći sloj koji također ima praškastu teksturu te granularnu strukturu je IC horizont na dubini od 20-50 cm. Horizont sa ilovasto praškasto-glinovitom teksturom te granularnom strukturom naziva se IIC, a na dubini je od 50-80 cm. Na dubini od 80-100 cm je IIIC horizont koji također ima ilovasto-praškasto-glinovitu teksturu te granularnu strukturu. Horizont IVC je posljednji C horizont na dubini 100-140 cm, tekstura mu je ilovasti prah a struktura granularna. Na dubini 140-170 nalazi se posljednji horizont  $G_{S_0}$  sa strukturom ilovastog pijeska i granularnom strukturom (Slika 6.1).



Slika 6.1. Profil tla (preuzeto iz Jašaragić – Rako, 2015.)

### 6.2. Gustoća tla

Horizonti pokazuju različitu gustoću tla. Tako horizont sa najvećom volumnom gustoćom tla je zadnji horizont  $G_{S_0}$ , a najmanju gustoću ima IIC horizont. Na Slici 6.2. su prikazane vrijednosti volumne gustoće tla za svaki horizont koji je potreban kod modeliranja u HYDRUS 1D programu.



**Slika 6.2. Volumna gustoća tla po horizontima**

### 6.3. Granulometrijski sastav

Na istraživanom profilu raspon granulometrijskih frakcija kreće se od čestica gline pa sve do krupnog pijeska. Međutim tlo je pretežno sastavljeno od praha s povećanim udjelom vrlo sitnog i sitog pijeska u horizontima IIIC, IVC, G<sub>so</sub>. Udio gline je najznačajniji u horizont IIC, dok se u donjim slojevima znatno smanjuje. Udio praha karakterističan je za horizonte tla pri vrhu istraživanog profila, dok se dubina povećava povećavaju se i čestice tla. Granulometrijski sastav za svaki horizont prikazan je u Tablici 6.1.

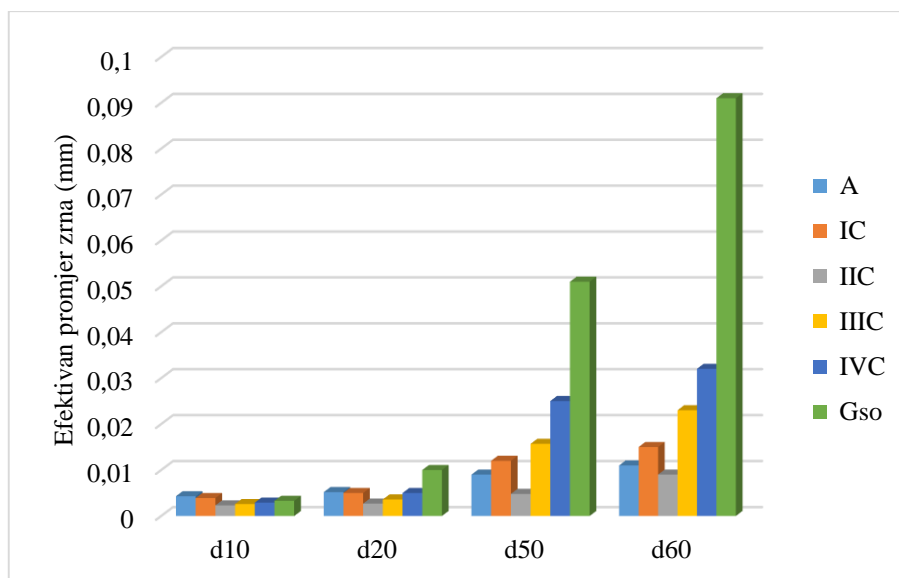
**Tablica 6.1. Udio pojedinih frakcija (%) po horizontima**

Frakcije	A	IC	IIC	IIIC	IV	G <sub>so</sub>
Glina	7,08	11,41	39,92	22,05	16,88	12,67
Prah	85,18	82,10	56,98	59,97	52,89	32,38
Pijesak	7,74	6,43	3,10	17,98	30,23	54,95
Šljunak	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00

Pri računanju hidrauličke vodljivosti pomoću navedenih empirijskih formula potrebni su podaci o udjelima  $d_{10}$ ,  $d_{20}$ ,  $d_{50}$  i  $d_{60}$  (Slika 6.3). Podaci su prikazani u Tablici 6.2, a dobiveni su iz granulometrijskih krivulja.

**Tablica 6.2. Očitane vrijednosti efektivnih promjera zrna**

Efektivni promjer zrna(mm)	A	IC	IIC	IIIC	IVC	Gso
$d_{10}$	0,0043	0,0039	0,0023	0,0026	0,0029	0,0033
$d_{20}$	0,0052	0,005	0,0027	0,0036	0,005	0,01
$d_{50}$	0,009	0,012	0,0048	0,0157	0,025	0,051
$d_{60}$	0,011	0,015	0,009	0,023	0,032	0,091



**Slika 6.3. Grafički prikaz udjela efektivnih promjera u horizontima tla**



#### 6.4. Rezultati empirijskog određivanja hidrauličke vodljivosti dobivene pomoću programa Rosetta - Lite

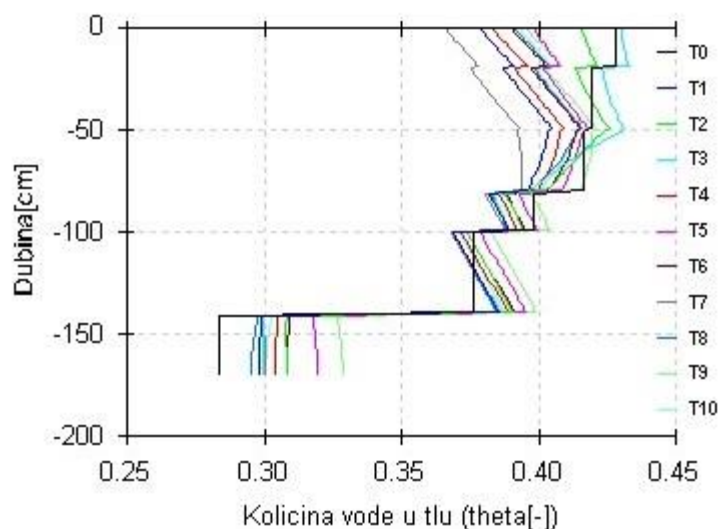
Rezultati određivanja hidrauličke vodljivosti pomoću empirijskih formula, prikazani su u Tablici 6.3. Pogledom na dobivene rezultate hidrauličke vodljivosti vidljiv je veliki raspon vrijednosti. Tako je raspon hidrauličke vodljivosti izračunat kod Almayani – Sen od  $4,7 \cdot 10^7$  do  $2,58 \cdot 10^9$ , Breyer od  $5,67 \cdot 10^{-1}$  do 2,15, Hazen od 6,87 do  $2,44 \cdot 10^7$ , Kozney – Carman od  $2,53 \cdot 10^1$  do  $3,37 \cdot 10^7$ , Slitcher od  $2,83 \cdot 10^1$  do  $6,36 \cdot 10^{22}$ , Terzaghi od 5,27 do  $6,35 \cdot 10^{13}$ , USBR od  $6,33 \cdot 10^{-3}$  do  $1,29 \cdot 10^{-1}$ . Navdene vrijednosti prikazane su u cm po danu. Određena je i hidraulička vodljivost pomoću softverskog programa Rosetta – Lite a ona je u rasponu od 18,8 do 35 cm/danu. Najmanje vrijednosti hidrauličke vodljivosti dobivene su prema empirijskim formulama od Breyer i USBR, dok ostale vrijednosti pokazuju jako velike razlike hidrauličke vodljivosti po horizontima tla.

**Tablica 6.3. Izračunate vrijednosti hidrauličke vodljivosti preko empirijskih formula i programa Rosetta - Lite (cm/dan)**

Formule $K_s(\text{cm/dan})$	A	IC	IIC	IIIC	IVC	Gso
Almayani_Sen	2,56E+09	1,19E+09	2,58E+09	3,08E+08	1,51E+08	4,70E+07
Breyer	2,15E+00	1,64E+00	5,67E-01	6,02E-01	7,08E-01	6,97E-01
Hazen	9,75E+00	1,89E+01	6,87E+00	1,83E+02	8,58E+02	2,44E+07
Kozeny_Carman	5,77E+02	7,34E+01	2,53E+01	2,64E+02	1,20E+03	3,37E+07
Slitcher	2,83E+01	3,00E+02	1,19E+02	2,75E+06	2,64E+08	6,36E+22
Terzaghi	5,27E+00	2,85E+01	1,08E+01	5,81E+03	1,02E+05	6,35E+13
USBR	2,86E-02	2,61E-02	6,33E-03	1,23E-02	2,61E-02	1,29E-01
Hydrus	3,59E+01	2,48E+01	1,18E+01	1,37E+01	1,96E+01	2,51E+01

#### 6.5. Rezultati prognoznog modela toka vode i transporta potencijalno toksičnih metala

Kroz pedološki profil tla (0-170 cm) na Slici 6.4. prikazana je simulacija vode za period od 03.01.2012. do 29.12.2014. Najveće količine vode su u prva tri sloja koja se nalaze na dubini od 0 – 20 cm (A), 20 – 50 cm (IC) i 50 – 80 cm (IIC). Potom količina vode postupno počinje opadati, ali u sloju na dubini od 100 – 140 cm (IVC) dolazi do blagog povećanja količine vode.



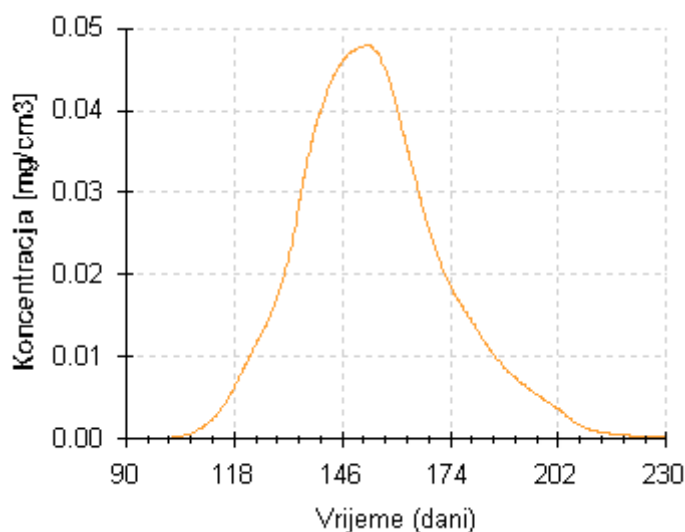
**Slika 6.4. Simulacija količine vode po pedološkom profilu tla (0-170 cm) u različitim vremenskim intervalima (T0-0 dan, T1-50 dan, T2-100 dan, T3-150 dan, T4-200 dan, T5-250 dan, T6-300 dan, T7-350 dan, T8-400 dan, T9-450 dan, T10-498 dan)**

Rezultati simulacije potencijalno toksičnih metala prikazani su Tablicom 6.4. iz koje je vidljivo da na dubini od 170 cm potencijalno toksični metali Cd i Zn pojavljuju prvi i to 42 dan, dok Cu i Pb se pojavljuju tek dan kasnije odnosno 43 dan. Cu i Pb najveću koncentraciju postižu 153 dan, Cd postiže najveću koncentraciju 150 dan, dok Zn postiže najveću koncentraciju 149 dan. Koncentracija se smanjuje s povećanjem dana, odnosno potencijalno toksični metali prodiru sve dublje u tlo ispod točke opažanja.

**Tablica 6.4. Rezultati simulacije potencijalno toksičnih metala**

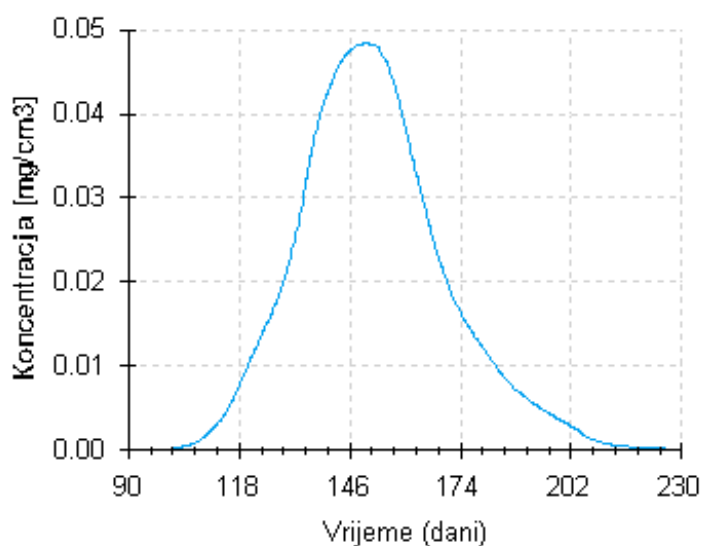
Dani	Cu	Pb	Cd	Zn
41	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00	0,0000E+00
42	0,0000E+00	0,0000E+00	0,3697E-29	0,1143E-28
43	0,9467E-29	0,9251E-29	0,3144E-28	0,7038E-28
146	0,4598E-01	0,4594E-01	0,4751E-01	0,4854E-01
147	0,4654E-01	0,4651E-01	0,4788E-01	0,4875E-01
148	0,4698E-01	0,4695E-01	0,4814E-01	0,4885E-01
149	0,4732E-01	0,4730E-01	0,4831E-01	0,4887E-01
150	0,4758E-01	0,4756E-01	0,4839E-01	0,4881E-01
151	0,4769E-01	0,4767E-01	0,4832E-01	0,4859E-01
152	0,4784E-01	0,4783E-01	0,4822E-01	0,4829E-01
153	0,4789E-01	0,4789E-01	0,4794E-01	0,4775E-01
154	0,4762E-01	0,4763E-01	0,4731E-01	0,4683E-01
497	0,1396E-25	0,1429E-25	0,3989E-26	0,1700E-26
498	0,1211E-25	0,1239E-25	0,3452E-26	0,1469E-26

Simulacija potencijalno toksičnog metala Cu prikazana je na Slici 6.5. gdje je jasno vidljivo njegovo kretanje kroz profil tla. Nailazak Cu počinje 43 dan, koncentracija doseže maksimum 153 dan, te se potom jasno vidi opadanje koncentracije Cu s vremenom.



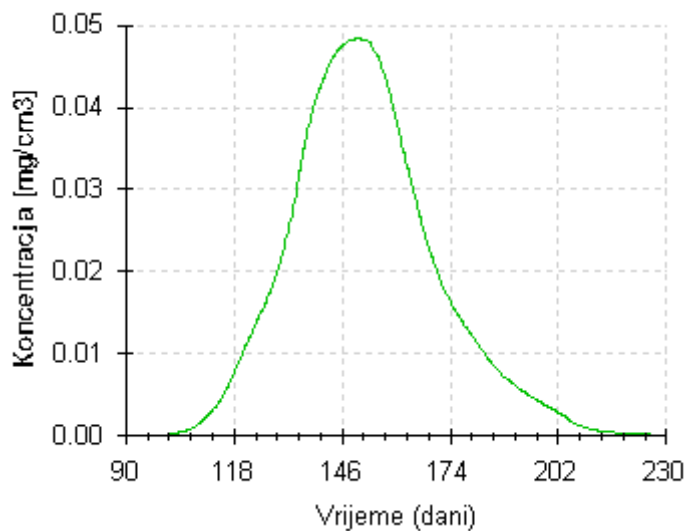
**Slika 6.5. Koncentracija Cu na dnu pedološkog profila tla (0 – 170 cm)**

Simulacija potencijalno toksičnog metala Pb prikazana je na Slici 6.6 gdje je jasno vidljivo njegovo kretanje kroz profil tla. Nailazak Pb počinje 43 dan, koncentracija doseže maksimum 153 dan, te se potom jasno vidi opadanje koncentracije Pb s vremenom.



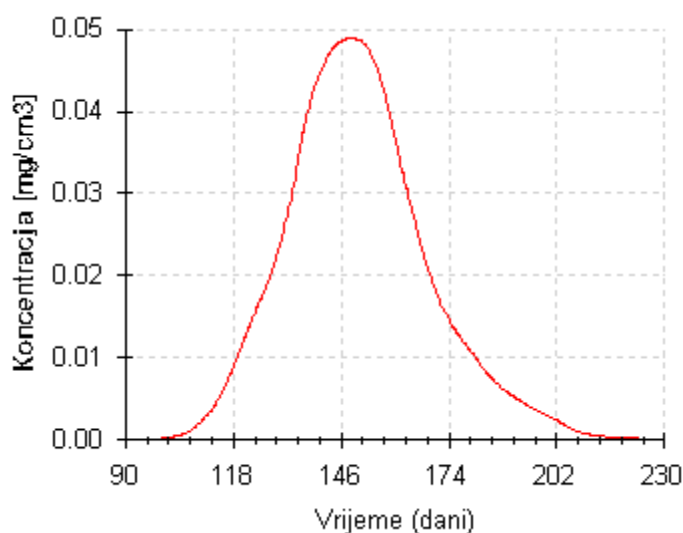
**Slika 6.6. Koncentracija Pb na dnu pedološkog profila tla (0 – 170 cm)**

Simulacija potencijalno toksičnog metala Cd prikazana je na Slici 6.7. gdje je jasno vidljivo njegovo kretanje kroz profil tla. Nailazak Cd počinje 42 dan, koncentracija doseže maksimum 150 dan, te se potom jasno vidi opadanje koncentracije Cd s vremenom.



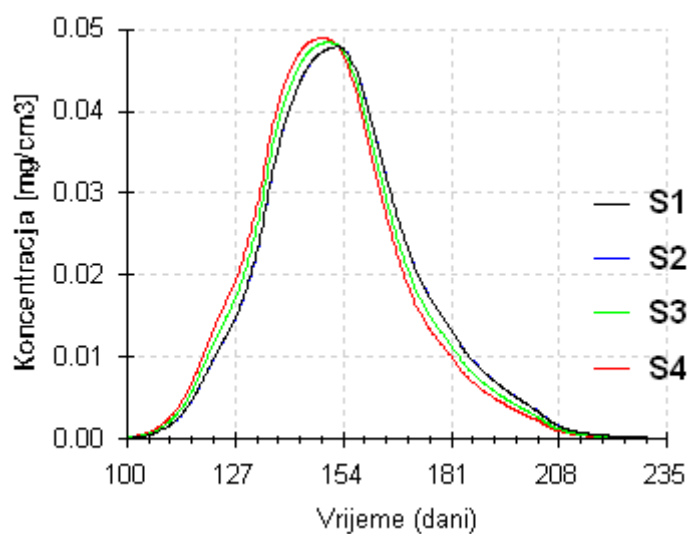
**Slika 6.7. Koncentracija Cd na dnu pedološkog profila tla (0 – 170 cm)**

Simulacija potencijalno toksičnog metala Zn prikazana je na Slici 6.8. gdje je jasno vidljivo njegovo kretanje kroz profil tla. Nailazak Zn počinje 42 dan, koncentracija doseže maksimum 149 dan, te se potom jasno vidi opadanje koncentracije Zn s vremenom.



**Slika 6.8. Koncentracija Zn na dnu pedološkog profila tla (0 – 170 cm)**

Ukupna simulacija potencijalno toksičnih metala Cu, Pb, Cd i Zn prikazana je na Slici 6.9. gdje se vidi pojavljivanje svih koncentracija, te njihov maksimum. Crvena linija (S4) označava koncentraciju Zn koja svoj maksimum doseže 149 dan, dok zelena (S3) označava koncentraciju Cd i ona svoj maksimum doseže 150 dan, a Cu i Pb su skoro pa identične linije, odnosno smeđa (S1) i plava (S2) linija se preklapaju, te one svoj maksimum dosežu 153 dan.



**Slika 6.9. Ukupne koncentracije potencijalno toksičnih metala na dnu pedološkog profila tla**

## 7. DISKUSIJA

Hidraulička vodljivost i vrijednosti hidrauličke vodljivosti se mogu razlikovati. Najniže pokazuju neraspucane magmatske i metamorfne stijene, dok najviše vrijednosti ima šljunak, okršeni i grebenski vapnenac i propusni bazalt. Hidraulička vodljivost predstavlja najčešće korišten hidrogeološki parametar u podzemnim vodama. Rezultati empirijskog određivanja hidrauličke vodljivosti prema različitim autorima za tla na istražnoj lokaciji Stara Loza prikazani su u poglavlju 6. Glavne prednosti empirijskog određivanja hidrauličke vodljivosti je brzina i jednostavnost. Međutim to ne znači i točnost dobivanja. S obzirom na uvjete kod određivanja hidrauličke vodljivosti koji su različiti te zavise od autora dobivaju se različiti rezultati. U Tablici 6.3 prikazani su rezultati hidrauličke vodljivosti po horizontima, gdje je vidljivo da jedina hidraulička vodljivost koja je logična te točnija od proračuna je ona dobivena programom Rosetta - Lite, dok su rezultati dobiveni empirijskim proračunima pokazali dosta velike varijacije. Rezultat toga je prvenstveno sastav i tekstura tla na lokaciji Stara Loza. Empirijske formule imaju svoje uvjete za različite sastave i vrsta tla, dok se program Rosetta - Lite koristi s mnoštvo podataka o sastavu tla, te na taj način daje točnije rezultate hidrauličke vodljivosti. Može se primijetiti da ima velikih kolebanja hidrauličke vodljivosti između horizonata tla. S obzirom na dobivene rezultate može se zaključiti da pojedini rezultati nisu vjerodostojni za ovu vrstu tla dobivenog sa istražne lokacije Stara Loza. Najvjerodostojniji i pouzdani su rezultati dobiveni programom Rosseta - Lite koji su korišteni pri izradi simulacijskog modela toka vode i potencijalno toksičnih metala. Empirijsko određivanje hidrauličke vodljivosti pokazalo se kao jako loš izbor za ovu vrstu tla odnosno za tla ilovasto-praškaste-glinovite teksture. Dobiveni rezultati u horizontima IIIC, IVC i  $G_{so}$  imaju puno veće vrijednosti, pogledom na granulometrijski sastav horizonata tla, jasno je vidljivo da povećanjem dubine dolazi do povećanja postotka pijeska u horizontima i to je jedan od razloga povećanja hidrauličke vodljivosti. U svojim istraživanjima Rawls et al. (1982) navode podjelu hidrauličke vodljivosti prema istraživanju 11 standardnih teksturnih tipova tla. Za ilovasti prah srednja vrijednost je 16,3 cm/dan te za ilovasti pijesak 62,1 cm/dan. Ružičić (2013) u svojoj doktorskoj disertaciji određuje hidrauličke vodljivosti u rasponu od 24 do 60 cm/dan, dobivene vrijednosti hidrauličke vodljivosti su sa istražne lokacije Kosnica. S obzirom da su tla na istražnoj lokaciji Stara Loza istih hidrauličkih i teksturnih karakteristika, određene

vrijednosti hidrauličke vodljivosti korištene u simulaciji toka vode i transporta potencijalno toksičnih metala u podudarnosti su s navedenim istraživanjima.

Prognozni model toka vode u tlu na istražnoj lokaciji simuliran je za razdoblje 2012. – 2014. Ukoliko se simulacije tečenja vode u pedološkom profilu tla na istražnoj lokaciji Stara Loza uspoređi sa srednjom dnevnom količinom padalina za pojedine mjesece u simuliranim godinama sa simuliranim podacima uočava se velika podudarnost. Usporedbom rezultata granulometrijskog sastava s modeliranom količinom vode, može se primijetiti da horizonti A, IC, IIC imaju najveće količine vode u tlu što odgovara i njihovom granulometrijskom sastavu. U horizontu IVC dolazi do postupnog povećanja prisutnosti količine vode koje je vidljivo iz simulacije, a dok horizont  $G_{so}$  ima najmanji udio količine vode zbog velikog udjela pijeska i na taj način i manjeg kapaciteta za vodu.

Potencijalno toksični metali Cu, Pb, Cd i Zn te njihov transport kroz nesaturiranu zonu pa sve do saturirane zone od velikog su značaja zbog mogućeg prodora i onečišćenja vodonosnika te podzemnih voda. Terenskim istraživanjima, a kasnije i laboratorijskim istraživanjima, detaljno su određene teksturno – strukturne karakteristike sedimentološko – pedološkog profila tla na istražnoj lokaciji Stara Loza u diplomskom radu Jašaragić – Rako (2015). Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da su na području istražne lokacije Stara Loza utvrđena tla ilovasto-praškaste-glinovite teksture. Takvo tlo je nastalo na nevezanom sedimentu pjeskovito-šljunkovite teksture kao posljedica fluvijalnog nanosa u riječnoj dolini, a ono je determinirano kao fluvijalno livadsko tlo. Detaljnim laboratorijskim istraživanjima granulometrijskog sastava, odnosno granulometrijskom analizom utvrđeno je dominacija praha, dok je u najdubljem horizontu dominacija pijeska. Volumna gustoća pokazuje da u najdubljem horizontu  $G_{so}$  ima najveću vrijednost, a to se može objasniti kao rezultat veće zbijenosti tla (Arvidsson, 2001; House et al., 2001). Plići horizonti imaju niže vrijednosti volumne gustoće zbog djelovanja korijena biljaka i drveća te zbog poljoprivrednih aktivnosti. Proces sorpcije je jako bitan pri modeliranju i simulaciji transporta potencijalno toksičnih metala u nesaturiranoj zoni. Određivanje sorpcije također je napravljeno detaljnim laboratorijskim istraživanjem u radu Jašaragić – Rako (2015.).

Prognozni model transporta potencijalno toksičnih metala napravljen je u programu HYDRUS 1D pomoću parametara koju su određeni laboratorijskim istraživanjima te teoretskim podacima (Radcliffe i Šimůnek, 2010). Prognozni numerički model

transporta potencijalno toksičnih metala u tlu na istraživanom području Stara Loza simuliran je za razdoblje od 2012. – 2014. godine. S obzirom na postavljene početne koncentracije metala koje su iznosili  $1 \text{ mg/cm}^3$  na samom vrhu profila, modelom su dobivene krivulje simuliranih vrijednosti koncentracija Cu, Pb, Cd i Zn prikazane u poglavlju 6. Olovo i bakar imaju najveće vrijednosti sorpcije u tlu što je i prikazano u rezultatima te dobiveno prognoznim modelom. Vega et al. (2008) u svom istraživanju dokazuje da sorpcija olova i bakra dobro korelira sa vrijednostima udjela Mn-oksida, vrijednostima CEC-a, zamjenjivog kalcija te prisutnosti minerala vermikulita. Sorpciju kadmija objasnio je da ovisi o pH, zamjenjivim kationima te prisutnošću drugih kationa te da u prisutnosti drugih metala ima manju kompetencijsku komponentu sorpcije. Također kadmij ima tendenciju migrirati u niže horizonte tla u kojem nema visokog udjela organske materije. Najmanju sorpciju ima cink što je vidljivo iz podataka dobivenih simulacijom u HYDRUS 1D programu. Sorpcijska svojstva cinka ovise o pH vrijednostima, te kao posljedica toga dolazi do povećanja efekta sorpcije u tlu. Tla sa visokim udjelom gline ili organske materije imaju veći kapacitet sorpcije nego što su tla s niskim udjelom organske materije i većim udjelom pijeska (Shuman, 1974). S obzirom na dobivene rezultate prognoznog modela potencijalno toksičnog metala cinka moguće je zaključiti da se s povećanjem udjela pijeska i smanjenjem organske materije sorpcija cinka također smanjuje.



## 8. ZAKLJUČAK

Pojedini rezultati dobiveni u diplomskom radu Jašaragić – Rako (2015) korišteni su u svrhu određivanja hidrauličke vodljivosti i simulaciju modela toka vode i potencijalno toksičnih metala Cu, Pb, Cd i Zn. Za tla ilovasto-praškaste-glinovite teksture empirijsko određivanje hidrauličke vodljivosti nije pouzdano. Što je jasno vidljivo iz rezultata koji su opisani u ovom radu. Prognozni model toka vode i potencijalno toksičnih metala simuliran je za razdoblje 2012. – 2014. godine. Simulirani su potencijalno toksični metali Cu, Pb, Cd i Zn da se vidi njihovo kretanje kroz profil u slučaju akcidentne situacije. S dubinom opadaju vrijednosti sorpcije što je jasno vidljivo iz Slike 6.9. Bakar i olovo putuju najsporije kroz profil te se jako dobro vežu za čestice tla. Dok kadmij i cink putuju puno brže i ne vežu se toliko za čestice tla, kao što se vežu bakar i olovo. Dobiveni rezultati u ovom radu pokazali su prednosti i mane izračunavanja hidrauličke vodljivosti preko empirijskih formula te pomoću programa Rosetta - Lite. Također, simulacijom je prikazano kretanje potencijalno toksičnih metala u slučaju događanja neke akcidentne situacije i ono je pokazalo s obzirom na ulazne parametre da postoji vjerojatnost za onečišćenjem. Daljnjim modifikacijama empirijskih formula dobilo bi se korigirane vrijednosti hidrauličkih vodljivosti s obzirom na teksturu i strukturu tla sa istražne lokacije Stara Loza. Stoga je ovaj rad odlična podloga za moguća daljnja istraživanja modifikacije empirijskih formula.

## 9. LITERATURA

ALYAMANI, M.S., i SEN, Z. (1993): Determination of Hydraulic Conductivity from Grain-Size Distribution Curves. *Ground Water*, 31,551-555 American Society of Agricultural Engineers, 25, str. 1316-1320.

ARVIDSSON, J. (2001): Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden. Soil physical properties and crop yield in six field experiments. *Soil Tillage Resources*, 60, str. 67–78.

BAČANI, A. I ŠPARICA, M. (2001): Geology of the Zagreb aquifer system. 9th International Congress of the geological society of Greece. September, str. 26–28. 1973-1979, Athens.

BAČANI, A. (2006): Hidrogeologija I, Sveučilišni udžbenik, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb. 198 str.

BAČANI, A., POSAVEC, K. (2011): Metode operacijskih istraživanja u hidrogeologiji. Sveučilišni udžbenik, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb. 123 str.

BEAR, J. (1979): *Hydraulics of Groundwater*. McGraw-Hill, 567 str., New York.

BEYER, W. (1966): Hydrogeologische Untersuchungen bei der Ablagerung von Wasserschadstoffen: *Zeitschrift fuer Angewandte Geologie*, v 12 No. 11: str. 599-606.

BLAŠKOVIĆ, I., DRAGIČEVIĆ, I. (1989): Studija prostornog rasporeda i geometrije sedimentnih tijela i njihov utjecaj na hidrogeološke odnose na području lijeve i desne obale Save od Bregane do Rugvice. RGN fakultet, Zagreb (neobjavljeno).

BOGUNOVIĆ, M., VIDAČEK, Ž., HUSNJAK, S., SRAKA, M., PETOŠIĆ, D (1996): Namjenska pedološka karta RH mjerila 1:300.000. Agronomski Fakultet - Zavod za pedologiju.

BRADL, H. B. (2004): Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents. *Journal of Colloid and Interface Science*, 277, str. 1-18.

CARMAN, P.C. (1956). *Flow of Gases through Porous Media*. Butterworths Scientific Publications, London. str. 182.

CHENG, C., i CHEN, X. (2007): Evaluation of Methods for Determination of Hydraulic Properties in an Aquifer- Aquitard System Hydrologically Connected to River. *Hydrogeology Journal*. 15: str. 669-678.

CRANK, J. i NICOLSON, P. (1947): A practical method for numerical evaluation of solutions of conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*, 44, str. 892-898.

DARCY, H. (1856): *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*. Victor Dalmont, Editeur, Paris. str. 587.

DOMENICO, P. A., SCHWARTZ, F. W. (1998): *Physical and chemical hydrogeology*. John Wiley and Sons, Inc, 2<sup>nd</sup> Edition, New York. 52-54 str.

DURN, G., MIKO, S., ČOVIĆ, M., BARUDŽIJA, U., TADEJ, N., NAMJESNIK-DEJANOVIĆ, K., PALINKAŠ, L.(1999): Distribution and behavior of selected elements in soil developed over a historical Pb-Ag mining site at Sv. Jakob, Croatia. // *Journal of geochemical exploration*. 67. str. 361-376.

ERN, A. i GUERMOND, J.L. (2004): *Theory and practice of finite elements*, Springer, 524 str., *Exploration*, 67, str. 361–376.

FILIPOVIĆ, V., PETOŠIĆ, D., NAKIĆ, Z., MUSTAĆ, I., RUŽIČIĆ, S., ZOVKO, M. i BUBALO, M. (2012): Identifying spatial and temporal variation of nitrate concentration in shallow groundwater aquifer. *Journal of Food Agriculture and Environment*. 10, (3 and 4), str. 1001- 1004.

FREUNDLICH, H. (1909): Kapillarchemie, Academiche Bibliothek, Leipzig.

HALAMIĆ, J., i MIKO, S., (2009): Geokemijski atlas Republike Hrvatske. Zagreb, Hrvatski geološki institut, str. 87.

HAZEN, A. (1892): Some Physical Properties of Sands and Gravels, with Special Reference to their Use in Filtration. 24th Annual Report, Massachusetts State Board of Health, Pub.Doc. No.34, str. 539-556.

HOUSE, M.L., POWERS, W.L., EISENHAEUER, D.E., MARX, D.B. i FEKERSILLASSIE, D. (2001): Spatial analysis of machine-wheel traffic effects on soil physical properties. Soil Science Society of American Journal, 65, str. 1376–1384.

HUSNJAK, S. (2012): Sistematika tala Hrvatske. Rukopis udžbenika. Sveučilište u Zagrebu Agronomski Fakultet - Zavod za pedologiju, 289 str.

KOZNEY, J. (1927): Über Kapillare Leitung Des Wassers in Boden. Sitzungsber Akad. Wiss.Wien Math.Naturwiss.Kl., Abt.2a, 136, str.271-306 (In German).

KUTILEK, M. i NIELSEN, D. (1994): Soil hidrology, CATENA VERLAG, Reiskirchen, 370 str.

LANGMUIR, I. (1917): The constitution and fundamental properties of solids and liquids. II. l'écoulement. Institut national de la recharge agronomique, Paris. str. 252.

LI, Z.B. i SHUMAN, L.M. (1997): Mobility of Zn, Cd and Pb in soils as affected by poultry Liquids. Journal of American Chemical Society, 39/9, str. 1848–1906.

- MCLEAN, J. E., i BLEDSOE B.E., (1992): Behavior of Metals in Soils. Washington, DC: Technology Innovation Office, Office of Solid Waste and Emergency Response. str.25.
- NAMJESNIK, K. (1994): Distribucija teških metala u tlama grada Zagreba i njegove okolice. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, str. 63.
- NAMJESNIK, K., PALINKAŠ, L., MIKO, S., DURN, G., POLIĆ, D. i KVRGNJAŠ, L. (1992): Lead, zinc, nickel and mercury in soil along road sides and of some rural and urban parts of Zagreb, Croatia.-Rudarsko-metalurški zbornik, Vol. 39, str. 93-112.
- ODONG, J. (2007): Evaluation of empirical formulae for determination of hydraulic conductivity based on grain size analysis. Journal of American Science No.3. str. 54-60.
- RADCLIFFE, D. E., ŠIMUNEK, J. (2010): Soil Physics with HYDRUS: Modeling and Applications. CRC Press, 373 str.
- RAWLS, W. J., BRAKENSIEK D.L. i SAXTON K.E. (1982): Estimation of soil water properties. American Society of Agricultural Engineers, 25, str.1316-1320.
- RICHARDS, L. A. (1931): Capillary conduction of liquids through porous mediums. Physics 1 (5): str.318–333.
- ROMIĆ, D. (2004): Stanje onečišćenja tala na prostoru Zagrebačke županije. Studija. Agronomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 71 str.
- RUŽIČIĆ, S., MILEUSNIĆ, M., POSAVEC, K. (2012): Building conceptual and mathematical model for water flow and solute transport in the unsaturated zone at Kosnica site. University of Zagreb. Faculty of mining, geology and petroleum engineering. Vol 25. str. 21-31.
- SAXTON, K. E., RAWLS, W. J. (2006): Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. Soil Science Society of America Journal. Vol:70, No: 5.

SCHAAP, M.G., F.J. LEIJ i M. TH. VAN GENUCHTEN (2001): Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*. No. 251. str.163-176.

SLICHTER C.S. (1898): Theoretical investigations of the motion of ground waters: United States Geological Survey, 19 th Annual Report, str. 295-384.

SOLLITTO, D., ROMIĆ, M., CASTRIGNANÒ, A., ROMIĆ, D i BAKIC, H. (2010): Assessing heavy metal contamination in soils of the Zagreb region (Northwest Croatia) using multivariate geostatistics. *Catena*. Vol: 80. No:3. str. 182-194.

SRAKA, M. (2005): Pedološka istraživanja. Autorizirane pripreme za vježbe iz Pedologije. Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet, Zavod za pedologiju, Zagreb, str. 22-26.

TERZAGHI, K., and PECK, R.B. (1964): *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Wiley, New York.

TINDALL, J.A. i KUNKEL, J.R., (1998): *Unsaturated Zone Hydrology for Scientists and Engineers*. Prentice Hall, 624 str., New York.

TURC, L. (1953): *Le bilan d'eau des sols: relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement*. Institut national de la recharge agronomique, Paris. str. 1-252.

URUMOVIĆ, K. (2003): *Fizikalne osnove dinamike podzemne vode*, Sveučilišni udžbenik, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, str. 42.

VAN DIJK, I.J.M. A (2003): *Eco – Hydrogeology*, Interna skripta. Vrije University, Amsterdam, Nizozemska (neobjavljeno).

VAN GENUCHTEN, M. Th. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, str. 44.

VEGA, F.A., COVELO, E.F., ANDRADE, M.L. (2008): A versatile parameter for comparing the capacities of soil for sorption and retention of heavy metals dumped

individually or together: Results for cadmium, copper and lead in twenty soil horizons. *Journal of Colloid and Interface Science*, 327. str. 275-286.

VELIĆ, J., DURN, G. (1993): Alternating Lacustrine-Marsh Sedimentation and Subaerial Exposure Phases During Quarternary: Prečko, Zagreb, Croatia.- *Geol. Croatica*, 46/1. str. 71-90.

VUKOVIC M., SORO A. (1992): Determination of Hydraulic Conductivity of Porous Media from Grain-Size Composition. Colorado: Water Resources Publications, Littleton. str. 55.

YOUNG, H. D., FREEDMAN R. (2000): *University physics. With modern physics.* 10th ed. San Francisco and Reading (MA). str. 35.