Modeliranje sezonske dinamike toka vode u nesaturiranoj zoni hidromorfnih tala

Mateković, Valentina

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Agriculture / Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:204:304359

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository Faculty of Agriculture University of Zagreb

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
AGRONOMSKI FAKULTET

MODELIRANJE SEZONSKE DINAMIKE TOKA VODE U NESATURIRANOJ ZONI HIDROMORFNIH TALA

DIPLOMSKI RAD

Valentina Mateković

Zagreb, rujan, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
AGRONOMSKI FAKULTET

Diplomski studij:
Melioracije

MODELIRANJE SEZONSKE DINAMIKE TOKA VODE U NESATURIRANOJ ZONI HIDROMORFNIH TALA

DIPLOMSKI RAD

Valentina Mateković

Mentor: Doc.dr.sc. Vilim Filipović

Neposredni voditelj: Dr. sc. Lana Filipović

Zagreb, rujan, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
AGRONOMSKI FAKULTET

IZJAVA STUDENTA

O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, **Valentina Mateković**, JMBAG 0178096916, rođena 12.05.1994. u Novoj Gradiški, izjavljujem da sam samostalno izradila diplomski rad pod naslovom:

MODELIRANJE SEZONSKE DINAMIKE TOKA VODE U NESATURIRANOJ ZONI HIDROMORFNIH TALA

Svojim potpisom jamčim:

- da sam jedina autorica ovoga diplomskog rada;
- da su svi korišteni izvori literature, kako objavljeni tako i neobjavljeni, adekvatno citirani ili parafrazirani, te popisani u literaturi na kraju rada;
- da ovaj diplomski rad ne sadrži dijelove radova predanih na Agronomskom fakultetu ili drugim ustanovama visokog obrazovanja radi završetka sveučilišnog ili stručnog studija;
- da je elektronička verzija ovoga diplomskog rada identična tiskanoj koju je odobrio mentor;
- da sam upoznata s odredbama Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu (Čl. 19).

U Zagrebu, dana _____ _____

Potpis studentice

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
AGRONOMSKI FAKULTET

IZVJEŠĆE

O OCJENI I OBRANI DIPLOMSKOG RADA

Diplomski rad studentice **Valentina Mateković**, JMBAG 0178096916, naslova

MODELIRANJE SEZONSKE DINAMIKE TOKA VODE U NESATURIRANOJ ZONI HIDROMORFNIH TALA

obranjen je i ocijenjen ocjenom _____ , dana

_____ .

Povjerenstvo: potpisi:

1. Doc. dr. sc. Vilim Filipović mentor _____
2. Dr. sc. Lana Filipović neposredni voditelj _____
3. Doc. dr. sc. Vedran Rubinić član _____
4. Doc. dr. sc. Ivan Mustać član _____

Zahvala

Ovom prilikom želim se zahvaliti mentoru Doc.dr.sc. Vilimu Filipoviću koji je prihvatio mentorstvo i predložio zanimljivu temu, te mi ustupio sve potrebne materijale i literaturu za izradu diplomskog, kao i na svome vremenu koje mi je ustupio kad god je bila potrebna pomoć.

Posebno se zahvaljujem svojim roditeljima koji su mi sve ovo omogućili i bez kojih ne bi bila tu gdje sad jesam, također zahvaljujem se i svojoj braći koji su me uvijek u svemu podržavali i bili uz mene.

Na kraju želim se zahvaliti svim prijateljima i drugim ljudima koji su bili uz mene kroz cijelo fakultetsko razdoblje te ga na bilo koji način olakšali i uljepšali.

Sadržaj:

1. Uvod 1
2. Pregled literature 2
2.1. Važnost resursa podzemnih voda 2
2.2. Monitoring podzemnih voda 4
2.2.1. Uzorkovanje podzemnih voda 4
2.2.2. Lokacije bušotina 5
2.2.3. Hidraulički gradijent 5
2.2.4. Geološki uvjeti 6
2.2.5. Svrha i značaj pravilne ugradnje piezometara (bušotina) za monitoring podzemnih voda 7
2.3. Instaliranje piezometra 9
2.3.1. Konstrukcija piezometara 9
2.3.2. Konstruiranje i položaj filtera na piezometru 11
2.4. Modeliranje 12
2.4.1. Jednadžba toka podzemne vode i pronosa tvari u saturiranoj zoni tla 13
2.4.2. Postavljanje modela 13
2.4.3. Modeliranje pronosa tvari u nesaturiranoj zoni tla 14
2.4.4. Tok vode u nesaturiranoj zoni tla 14
2.4.5. Prikaz važnijih modela pronosa tvari 15
2.4.6. Hidraulička svojstva tla 16
3. Cilj istraživanja 18
4. Materijali i metode rada 18
4.1. Klima i bilanca vode 18
4.2. Značajke tla na istraživanim lokacijama 21
4.3. Način vlaženja tla 26
4.4. Kalibracija i optimizacija hidrauličkih parametara tla 27

4.5. Uzgajane kulture i gnojidba 28
4.6. Vrijednosti potencijalne evapotranspiracije na području Melioracijskog kanala 28
4.7. Matematički opis toka vode i transporta onečišćivala 28
5. Rezultati i rasprava 31
6. Zaključak 39
7. Literatura 40
8. Životopis 43

Sažetak

Diplomskog rada studentice **Valentina Mateković**, naslova

MODELIRANJE SEZONSKE DINAMIKE TOKA VODE U NESATURIRANOJ ZONI HIDROMORFNIH TALA

Podzemne vode uključuju vodu smještenu u dubljim slojevima tla u uvjetima potpune saturacije. Tok podzemne vode podijeljen je na strujanje u saturiranim i nesaturiranim uvjetima. Tok u nesaturiranoj sredini prvenstveno je vertikalan, a tok u saturiranoj sredini prvenstveno je horizontalan. Modeli toka podzemnih voda opisuju tok podzemnih voda i transport tvari pomoću matematičkih jednadžbi temeljenih na pojednostavljenim pretpostavkama. U nesaturiranoj zoni tla modeliranje je složenije zbog stalne promjene vlažnosti tla uslijed oborina kao i varijacija razine podzemne vode. Određivanje vodnog režima nesaturiranih horizonata tla uzimajući u obzir sezonske razlike u razinama podzemnih voda na odabranim lokacijama provedeno je pomoću numeričkog modela HYDRUS-1D. Numerički model ispitan je pomoću podataka dobivenih s lizimetra na pet lokacija u polju Bid (istočna Hrvatska). Model je validiran na temelju isteka iz samih lizimetra s visokom razinom pouzdanosti (R^2 = 0,87 - 0,96). Hidropedološka svojstva tla određena su na pet lokacija kako bi se mogao odrediti režim vode tla nesaturirane zone s obzirom na sezonske varijacije razine podzemnih voda mjerenih u blizini svake odabrane lokacije. Rezultati su pokazali velike varijacije u razinama podzemnih voda na svakoj lokaciji, što je bio glavni uzrok oscilacija relativne količine vode i vodnog potencijala u višim slojevima tla. Niska količina oborina u promatranoj godini rezultirala je još većim utjecajem podzemnih voda na pokusnom području. Navedeni rezultati ukazuju na važnost resursa podzemnih voda u poljoprivrednoj proizvodnji s obzirom na njihov značajan utjecaj na površinski horizont tla, a posebno kada su potrebni sustavi navodnjavanja.

Ključne riječi: tok vode u tlu, lizimetar, modeli toka, nesaturirana zona, numerički model

Summary

Of the master's thesis – student **Valentina Mateković,** entitled

MODELING SEASONAL WATER FLOW DYNAMICS IN UNSATURATED ZONE OF HYDROMORPHIC SOIL

Groundwater includes water located in deeper soil layers characterized by a complete saturation. The groundwater flow is divided to flow in saturated conditions and flow in unsaturated conditions. Water flow in unsaturated medium is primarily vertical and water flow in the saturated medium is primarily horizontal. Water flow models describe the groundwater flow and solute transport using mathematical equations based on certain simplified assumptions. In unsaturated soil zone modeling is more complex due to the constant change in soil moisture as a result of precipitation and groundwater level variations. Determining the water regime of the unsaturated soil zone, while taking into account the seasonal variations of groundwater levels at selected locations, were carried out using the HYDRUS-1D numerical model. The numerical model was tested using the data obtained from the lysimeters at five locations in the Bič field (eastern Croatia). The model was successfully validated with a high level of confidence on lysimeter outflow (R^2 = 0,87 – 0,96). Hydropedological soil properties were determined at five locations to determine soil water regime of the unsaturated soil zone considering seasonal variations of groundwater levels measured at the proximity of each location. Results show different groundwater levels at every location, which had a major influence on water content and pressure head oscillations in the upper soil layers. The low amount of precipitation in the observed year resulted in even larger effect of groundwater levels at the experimental sites. Results highlight the importance of groundwater resources in agricultural production because of their significant influence on soil surface layer, especially when irrigation practices are needed.

Key words: soil water flow, lysimeter, water flow models, unsaturated zone, numerical model

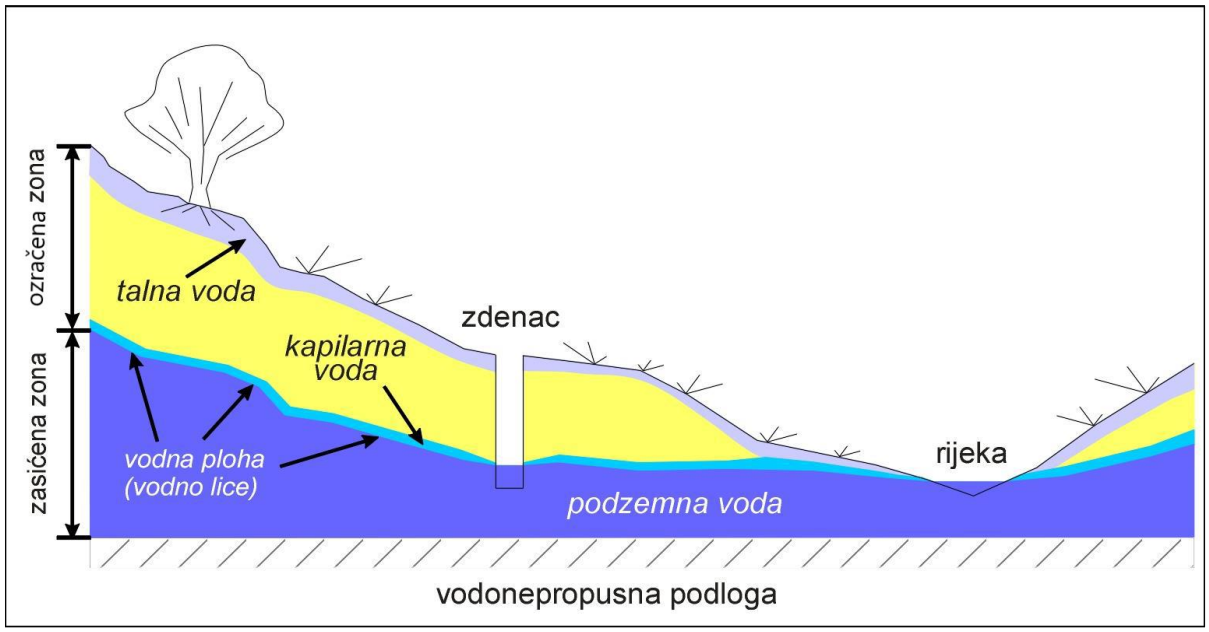
1. Uvod

Voda je tvar koja je od presudne važnosti za sav živi svijet te je zbog toga problem njezina potencijalnog onečišćenja iznimno značajan. Kako bi se spriječilo daljnje onečišćenje voda provodi se monitoring, kako površinskih tako i podzemnih voda. Monitoringom se utvrđuje tzv. "nulto stanje" s obzirom na promatrane parametre, te se na osnovu praćenja određenih parametara kvalitete vode i utvrđivanjem njihovih prosječnih vrijednosti donose odluke o zaštiti vodnog područja. Pri prikupljanju uzoraka vode na terenskim lokacijama koriste se lizimetri i piezometri. Podzemne vode obuhvaćaju vodu koja se nalazi u dubljim slojevima tla, a tlo karakterizira potpuna zasićenost. Tok podzemnih voda dijeli se na tok u zasićenim uvjetima gdje je je on horizontalan, te na tok u nezasićenim uvjetima gdje je tok vertikalan. Mnoge kemijske tvari koje se koriste u poljoprivrednoj proizvodnji mogu predstavljati ozbiljan problem ako se procijede u dublje slojeve tla i dospiju do podzemne vode. Prilikom proučavanja procesa u okolišu koriste se razni matematički modeli kretanja (toka) vode u tlu. Modeli matematički pojednostavljuju verziju hidrogeološkoga sustava te omogućuju predviđanja, testiranja i uspoređivanje alternativnih scenarija, a jedan od takvih matematički modela je i programski paket HYDRUS. Modeli kretanja toka podzemnih voda opisuju protok tokova podzemnih voda i transport tvari pomoću matematičkih jednadžbi koristeći pojednostavljene pretpostavke. Modeliranje je složenije u nesaturiranoj zoni tla zbog stalne promjene vlažnosti, a uzrok tome su oborine i varijacije razina podzemne vode. Primjenom kombinacije okolišnog monitoringa toka vode u nesaturiranoj zoni tla (lizimetri) i određivanja razina podzemnih voda pomoću piezometara te korištenjem numeričkih modela moguće je pouzdano utvrditi interakcije podzemnih voda i oborina i njihov utjecaj na vodni režim u površinskim horizontima tla. U nastavku rada utvrđen je utjecaj podzemnih voda na režim vlaženja površinskih horizonata tla na pojedinim lokacijama.

2. Pregled literature

2.1. Važnost resursa podzemnih voda

Hidropedološki pristup podrijetlu podzemnih voda temelji se na poznavanju stratigrafske građe tla, njegovih osnovnih fizikalno-hidrauličkih obilježja i hidroloških uvjeta područja. Hidropedološki pristup vrlo je blizak hidrogeološkom, koji pod pojmom podzemnih voda obuhvaća vodu koja potpuno saturira određeni sloj profila tla i nalazi se ispod vodne plohe (vodnog lica) (slika 1).

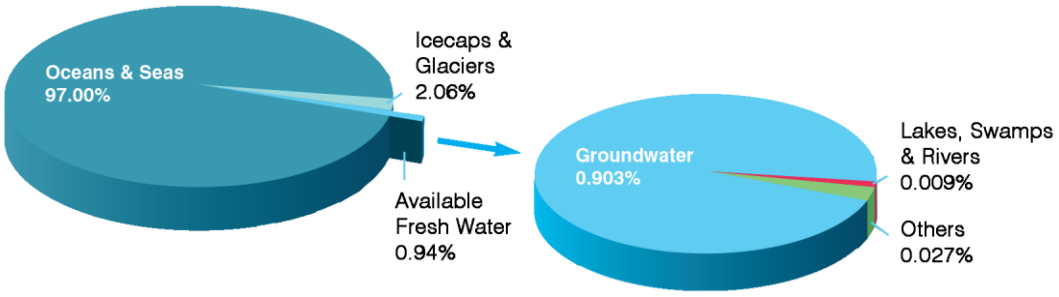


Slika 1. Shematski prikaz načina pojave vode u podzemlju (Urumović, 2003.)

Prema navedenoj shemi (slika 1) podzemlje se dijeli na dva temeljna dijela, zasićeno ili saturirano područje (s podzemnom vodom) i ozračeno ili nesaturirano područje. U ozračenom dijelu podzemlja, prema pojavljivanju i načinu cirkulacije vode, razlikuju se tri zone: zona talne vode, međuzona i kapilarna zona.

Ovisno o topografskim-hidrološkim uvjetima područja, ozračeno područje s međupojasom može izostati, a zasićeno područje s podzemnom vodom u tom slučaju zahvaća talni dio, odnosno pojas talnih voda (Ondrašek i sur. 2015.).

Podzemne vode predstavljaju oko 30% svjetske slatke vode. Od ostalih 70%, gotovo 69% je zarobljeno u ledenim pokrivačima i u planinskom snijegu/ ledenjaku, a samo 1% se nalazi u rijekama i jezerima. Podzemne vode u prosjeku bilježe jednu trećinu svježe vode koju ljudi konzumiraju, ali u nekim dijelovima svijeta ovaj postotak može doseći do 100%. Na donjoj slici (slika 2) prikazan je prikaz raspodjele vode na Zemlji (www.un-igrac.org).



Slika 2. Raspodjela vodnih resursa na Zemlji (www.un-igrac.org)

Podzemne vode su vrlo važan prirodni resurs i imaju značajnu ulogu u gospodarstvu. To je glavni izvor vode za navodnjavanje i prehrambenu industriju. Podzemne vode općenito su pouzdani izvor vode za poljoprivredu i mogu se koristiti na fleksibilan način. Globalno, navodnjavanje čini više od 70% ukupnog crpljenja vode (površinske i podzemne vode). Procjenjuje se da se podzemne vode koriste za oko 43% ukupne potrošnje vode za navodnjavanje.

Osim toga, podzemne vode su prirodni resursi koji se često mogu naći u neposrednoj blizini krajnjih potrošača i stoga ne zahtijevaju velike investicije u smislu infrastrukture i obrade, što je često potrebno pri sakupljanju površinske vode. Najvažnije pri korištenju podzemnih voda je pronaći ravnotežu između crpljenja vode i omogućavanja oporavka vodonosnika kako bi se izbjeglo prekomjerno iskorištavanje i kako bi se izbjeglo onečišćenje ovog ključnog resursa (www.un-igrac.org).

.

2.2. Monitoring podzemnih voda

Voda je tvar koja je od presudne važnosti za sav živi svijet te je zbog toga problem njezina potencijalnog onečišćenja iznimno značajan. Kao posljedice onečišćenja, ovisno o vrsti, mogu se pojaviti problemi poput eutrofikacije i ekotoksičnosti. Ugrožavanje voda na jednom području prenosi se, ovisno o vrsti i stupnju zagađenosti i na druga područja. Zbog toga prvenstveno treba osigurati zaštitu voda i spriječiti njeno onečišćenje.

Da bi se osigurala zaštita i prevencija onečišćenja pitke vode potrebno je razviti i unaprijediti monitoring kako površinskih tako i podzemnih voda na lokacijama gdje postoji velika opasnost od onečišćenja. Monitoring je proces s definiranom svrhom opetovanog motrenja jednog ili više elemenata okoliša u skladu s programom definiranim u prostoru i vremenu, uz korištenje usporedive metodologije praćenja okoliša i sakupljanja podataka (Šurmanović i sur 2003.).

Monitoringom se može odrediti tzv "nulto stanje" s obzirom na parametre koji su predmet navedenog istraživanja i dalje nastaviti praćenje tih istih parametara da bi se dobio prosjek i vremenski trend nakon kojeg bi se, ukoliko je to potrebno zaštitilo područje od onečišćenja.

Da bi se odredili ciljevi monitoringa potrebno je prvo identificirati dijelove okoliša, odrediti prirodne i/ili antropogene uzročnike promjena u okolišu te njihove međusobne interakcije.

Ciljevi su direktno vezani uz oblik onečišćenja na temelju kojeg kasnije oblikujemo način monitoringa. Razlikujemo monitoring površinskih i podzemnih voda. Kod praćenja kvalitete podzemnih voda parametri koje procjenjujemo su isti kao i kod površinskih voda, međutim sam proces uzorkovanja se bitno razlikuje, zbog potrebe za instaliranjem opreme koja nam omogućuje samo prikupljanje uzoraka. Prilikom pokretanja monitoringa važno je dobro isplanirati istraživanje, postaviti opremu i imati provjeren sustav obrade prikupljenih podataka (Marijanović i sur., 2008.).

2.2.1. Uzorkovanje podzemnih voda

Kako napredovanje u laboratorijskim analitičkim metodama omogućuje detekciju sve manjih koncentracije sve većeg broja spojeva u podzemnim vodama, tako se i povećava potreba za preciznijim i točnijim tehnikama uzorkovanja. Često, jedan ili više ciljeva će utjecati na eventualnu metodu uzorkovanja, lokaciju ili protokol. Jedan od tih ciljeva se može odnositi na zadovoljavanje zakonske regulative vezane za dopuštene koncentracije određenih polutanata u vodama, prikupljanje podataka za upravljane ili saniranje onečišćenog područja, ili procjenu tzv. "nultog stanja" prije razvitka tog područja (razvitka u onom smjeru za koje je to područje predviđeno).

Većina uzorkovanja i praćenja kvalitete podzemnih voda je vezana uz tzv. točkaste izvore onečišćenja zbog saniranja i čišćenja mjesta gdje je došlo do kontaminacije raznim polutantima kao što su izljevi iz industrijskih postrojenja, odlagališta otpada i slično. Programi uzorkovanja na kontaminiranim područjima su vezani najčešće uz zakonske propise o maksimalno dopuštenim koncentracijama kako bi se prema dobivenim rezultatima moglo sanirati nastalo onečišćenje. Učestalost uzimanja uzoraka može se prilagoditi promjenama koje se događaju u kvaliteti podzemne vode na mjestu istraživanja.

Praćenje kvalitete podzemne vode se nekad izvodi u svrhu dobivanja “slike” uvjeta u podzemnoj vodi nekog područja u određenom vremenu. Ovisno o namjeni područja i specifičnosti problema za određenu lokaciju, praćenje može uključivati teške metale, pesticide ili neke organske spojeve. Ako radimo analizu područja prije razvitka neke industrijske proizvodnje, u sustav praćenja ćemo uključiti potencijalne onečišćivače koje možemo očekivati na tom području nakon otvaranja industrijske proizvodnje.

Zajednički cilj svih tipova monitoringa je dobiti što kvalitetnije uzorke koji će biti reprezentativni i odgovarati stvarnim uvjetima kvalitete podzemne vode s njegove izvorne lokacije (Herzog i sur., 1991.).

2.2.2. Lokacije bušotina

Monitoring podzemnih voda se u pravilu odnosi na uzimanje uzoraka iz prethodno postavljene mreže bušotina. Treba paziti prilikom postavljanja piezometara (bušotina), jer ako piezometre ne postavimo na dobru lokaciju ili ne konstruiramo kako bi trebalo podaci koje ćemo dobiti mogu dati krivu “sliku” onečišćenja određivanje rasporeda bušotina je kompliciranije što je područje heterogenije u usporedbi sa homogenijom stratigrafijom područja. U početnoj fazi postavlja se prva grupa piezometara, uzimaju podaci o stratigrafiji terena, mjere se razine podzemne vode i određuju parametri kvalitete podzemne vode. Podaci uzeti sa prve grupe piezometara se prikupljaju i analiziraju prije odluke o točnim lokacijama postavljanja druge grupe piezometara. Takav pristup nam omogućuje prikupljanje kvalitetnijih rezultata i ciljano pronalaženje uzroka onečišćenja i praćenje njegovog trenda (smanjenja ili povećanja) kroz određeni vremenski period (Aller i sur., 1989.).

2.2.3. Hidraulički gradijent

Podzemna voda teče brže tamo gdje su vrijednosti hidrauličkog gradijenta i/ili hidrauličke vodljivosti veće. Brzine tečenja podzemne vode su puno sporije nego brzine tečenja površinskih tokova, osim u nekim krškim područjima, gdje voda teče kroz spilje i velike podzemne kanala. Oscilacije u brzini i dubini podzemnih voda jako variraju, ali najčešće ne prelaze više od nekoliko metara dnevno. Na regionalnoj razini, tokovi podzemne vode prate režim toka površinskih voda. U slivu gdje se ispumpava

podzemna voda, smjer toka podzemne vode je određen bušotinama za ispumpavanje vode. U nižim područjima smjer toka podzemne vode u pravilu prate oscilacije u površinskim tokovima (Aller i sur., 1989.).

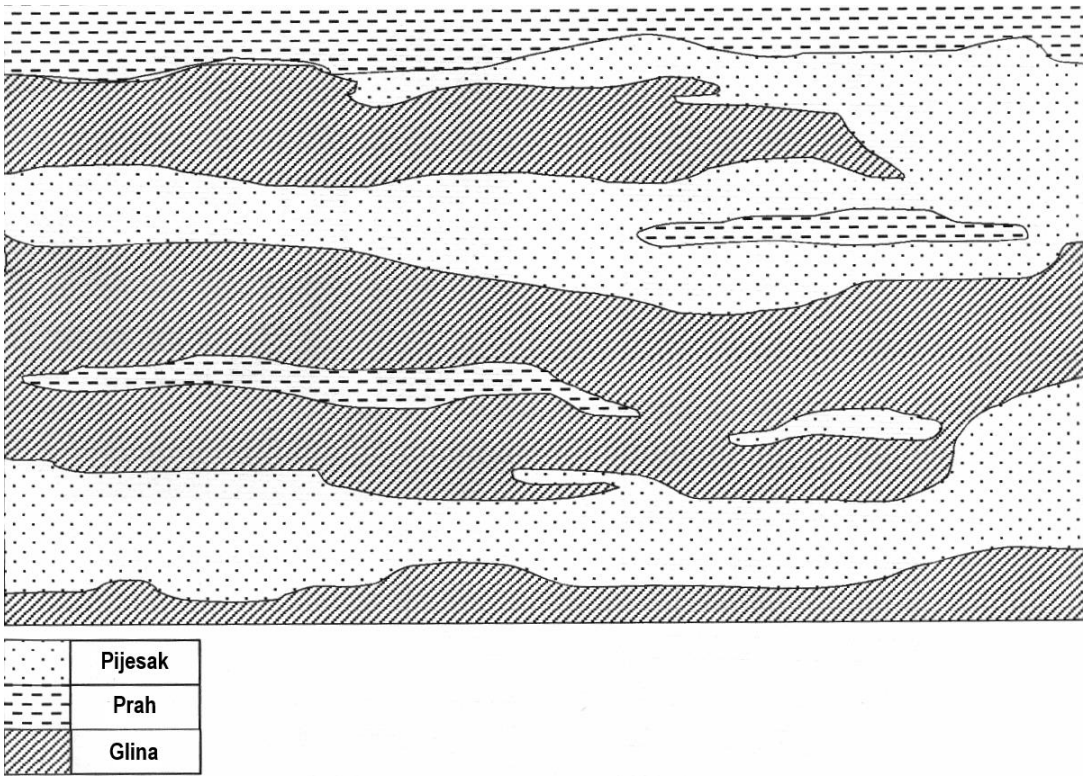
2.2.4. Geološki uvjeti

Podzemna voda ima tendenciju da gravitacijski prati smjer s najmanje otpora do vodonosnika. Tokovi podzemne vode će se mijenjati tamo gdje postoji veliki kontrast u hidrauličkim svojstvima vodonosnika, kao na primjer u uvjetima gdje teško propusni stjenoviti materijali ulaze u sedimentacijske slivove i na taj način ograničavaju podzemne tokove. U aluvijalnim slivovima, tokovi podzemne vode prate zone krupnozrnatih propusnijih materijala. U stjenovitim vodonosnicima podzemne vode prate veće pukotine i na taj način zaobilaze gušće materijale (strukture). Takvi geološki uvjeti često su važan faktor za interpretaciju razina i kvalitete podzemnih voda na mjestima postavljenih bušotina. Heterogenost akvifera se odnosi na varijacije u hidrogeološkim svojstvima od mjesta do mjesta ispod površine (slika 3). Stupanj heterogenosti varira od lokacije do lokacije i povezan je s okolinom u kojoj se sedimenti talože.

Glacijalne i fluvijalne naslage u pravilu imaju veći stupanj heterogenosti od morskih i riječnih sedimanata. Na podzemne tokove i prijenos onečišćenja veliki utjecaj ima hidrogeološka heterogenost područja. U sustavima veće heterogenosti, tokovi podzemne vode mogu biti vrlo kompleksni i iskrivljeni. Podzemna voda ima tendenciju vrlo brzog kretanja kroz krupnozrnaste sedimente i vrlo sporog kretanja kroz naslage finijih sedimenata manje granulacije. U takvih uvjetima je teško odrediti lokaciju piezometara za monitoring kao i dubine na kojoj će biti postavljen filter. Ako piezometre postavimo na većoj površini postoji mogućnost da nam dotok podzemne vode sa šireg područja utječe na pouzdanost uzoraka na taj način da ih razrijedi, dok piezometri koje postavimo na uže područje ne moraju nužno u cijelosti zahvatiti područje koje je onečišćeno. Zbog toga bi u pravilu u područjima veće heterogenosti trebalo prilagoditi broj piezometara heterogenosti tog područja da bi se u konačnici dobili što kvalitetniji uzorci i točniji rezultati. Nije rijedak slučaj da se susretnemo s sustavom višestrukih vodonosnika u sedimentacijskim slivovima. Takvi sustavi se formiraju tamo gdje nailazimo na slabo propusne glinovite materijale koji odvajaju materijale sa većom propusnošću i na taj način formiraju zatvorene vodonosne sustave.

Tokovi podzemne vode kao i kvaliteta u takvim sustavima jako variraju između vodonosnika. Postavljanje piezometara u takve sustave treba biti pažljivo izvedeno da bi se izbjegla kontaminacija između različitih zona vodonosnika. Piezometri koji su nepravilno zabrtvljeni ili konstruirani mogu povećati pronos polutanata između zona vodonosnika i na taj način povećati onečišćenje i na kraju troškove uklanjanja onečišćenja. U pravilu takvi sustavi višestrukih akvifera se prate odvojeno, s različitim

piezometrima konstruiranim posebno za svaki vodonosni sloj. Također se mogu konstruirati tako, da se u jednu bušotinu postavi dvije ili više cijevi i na taj način prati razina i/ili kvaliteta na različitim dubinama u različitim vodonosnicima. Velika pažnja se treba posvetiti ispravnosti postavljanja i sprječavanju pronosa tvari među vodonosnim slojevima.



Slika 3. Vertikalni presjek profila koji prikazuje heterogenost potpovršinskih horizonata tla (Aller i sur., 1989.)

2.2.5. Svrha i značaj pravilne ugradnje piezometara (bušotina) za monitoring podzemnih voda

Primarni cilj ugradnje piezometara (bušotina) je da se osigura polazišna točka za mjerenje razine podzemne vode i da se omogući pribavljanje uzoraka podzemne vode koji mogu točno interpretirati *in situ* uvjete na specifičnoj točki uzorkovanja.
Da bi se osigurali ti uvjeti, potrebno je ispuniti sljedeće kriterije:

1. Konstruirati bušotinu sa minimalnim narušavanjem okolinskih elemenata
2. Koristiti materijale koji neće utjecati na elemente koji se ispituju prilikom analize kvalitete vode (PVC).
3. Prilikom instalacije piezometara treba dobro zabrtviti područje uz samu cijev (glina), kako oborinska voda ne bi prodirala do ugrađenog filtera na određenoj dubini i samim time utjecala na rezultate analize vode iz tog sloja.
4. Izbušiti bušotinu u dovoljnom promjeru da se uklone svi mogući dodatni utjecaji povezani sa bušenjem i da se omogući nesmetan tok vode kroz piezometar.

U dodatku gore navedenih konstrukcijskih zahtjeva bušotina mora biti dizajnirana tako da se mogu zadovoljiti svi ciljevi monitoringa. Ključni faktori koji moraju biti ispunjeni su sljedeći:
1. Ciljana svrha bušotine (da udovoljava kriterijima koji su nam potrebni kod monitoringa).
2. Dobar položaj bušotine da bi se osigurale točne razine podzemne vode i/ili dobili reprezentativni uzorci za analizu kvalitete vode.
3. Dovoljan promjer bušotine da bi se osigurao daljnji razvitak piezometara (ovisno o budućim potrebama) te da bi se osiguralo nesmetano uzorkovanje vode sa opremom za uzimanje uzoraka.
4. Zaštita površine da bi se spriječila promjena strukture i utjecaj površinskih voda na naše uzorke.

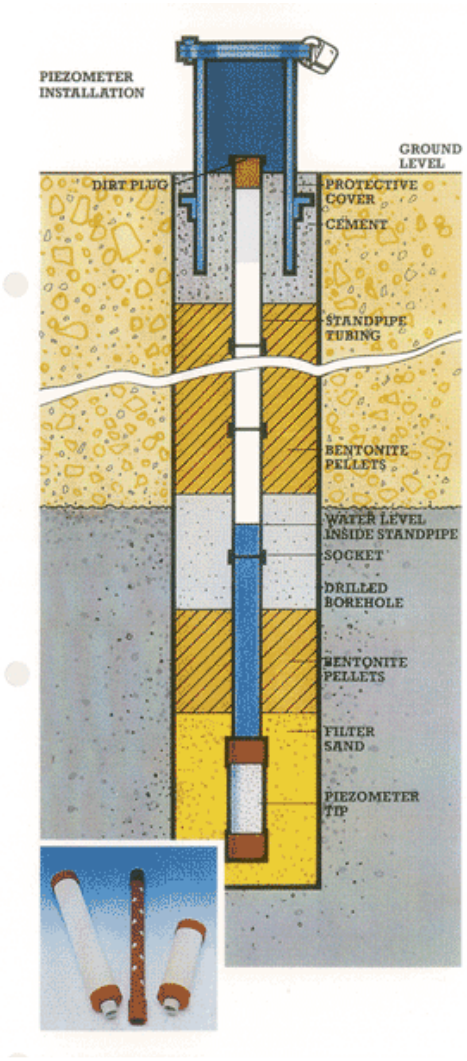
Ako se prilikom konstrukcije piezometara nije pazilo na gore navedene čimbenike dobiveni rezultati mogu biti nepouzdani. Prilikom korištenja otapala kod varenja PVC cijevi Sosebee i sur. (1983.) može doći do ispiranja značajnih količina tetrahidrofurana, metiletil ketona, metilbutil ketona i raznih sintetičkih kemikalija u vodu i na taj način utjecati na konačne rezultate.
Također prilikom samog bušenje i postavljanja piezometara, sama tehnika bušenja može kasnije utjecati na kvalitetu uzoraka vode. Brobst i Buszka (1986.) su otvrdili da organske tekućine korištene prilikom tzv “mokrog bušenja” mogu imati efekt na kemijsku potražnju kisika u podzemnoj vodi u odnosu na bušotine koje su bušene rotacijskim načinom.
Vertikalni tok vode uz stijenke piezometarske bušotine također može utjecati na kvalitetu rezultata. Zbog toga se taj dio brtvi, najčešće sa nekim materijalima na bazi cementa. Whermann (1983.) je zabilježio kako se ne preporuča korištenje materijala na bazi cementa u dubljim slojevima zbog mogućnosti pucanja tijekom vremena i dovođenja do nepravilnog brtvljenja. Također do prodora površinske vode može doći tijekom vremena zbog smanjivanja cijevi prilikom razlika u temperaturi.
Prilikom instaliranja opreme treba obratiti pažnju na sve elemente, kako bi dobili što pouzdanije rezultate i što kvalitetniji uzorak te u što manje promijenjenom stanju u odnosu na to kakav je u prirodnoj sredini.

2.3. Instaliranje piezometra

2.3.1. Konstrukcija piezometara

Iako se prilikom konstrukcije piezometara treba obratiti pozornost na specifičnost pojedine lokacije, piezometri se uglavnom sastoje od istih konstrukcijskih dijelova (slika 4). Na površini imamo zaštitnu cijev izrađenu najčešće od metala kako bi se bušotina zaštitila fizički od raznih okolinskih utjecaja. Zaštitna cijev je ugrađena ispod površine i učvršćena nepropusnim materijalima da bi se na taj način spriječila površinska infiltracija uz samu cijev i utjecaj na naš uzorak. Filter se ugrađuje u horizont i na dubinu u kojoj se želi pratiti utjecaj onečišćenja. Oko same cijevi na filteru se ugrađuje mrežasti omotač te također šljunčani materijal koji će spriječiti ulazak finih čestica praha u piezometar i ujedno djelovati kao hidraulički filter te ubrzati dotok vode u piezometar.

Piezometri se konstruiraju tako da u pravilu omoguće male količine uzoraka iz vodonosnika (do nekoliko litara). Poželjne su bušotine malog promjera (2,5 do 10 cm) da bi se izbjeglo ispumpavanje velikih količina vode prilikom pročišćavanja bušotine. Prilikom bušenja treba paziti da bi se lokaciju što manje kontaminiralo alatom ili tekućinama koje se koriste prilikom bušenja. Poželjno je sakupiti uzorke tla i vode prilikom bušenja da bi se kasnije mogli usporediti sa uzorcima uzetim nakon postavljanja piezometara i na taj način procijeniti utjecaj samog izvođenja bušotina na kvalitetu vode. Za bušenje se mogu upotrijebiti razni razne metode bušenje od kojih su neke: reversno, direktno, udarno, bušenje laviranjem i utiskivanjem zaštitne kolone.
Metoda bušenja se odabire obzirom na geologiju područja i naravno na dubinu na koju ćemo bušiti. Ako imamo čvrste formacije (stijene, puno skeleta) to nam eliminira određene metode bušenja. Na primjer u krškim područjima, razne šupljine stvaraju znatne probleme u održavanju cirkulacije i zaštiti opreme za bušenje (Aller i sur., 1989.).



Slika 4. Prikaz modela piezometra i njegovih dijelova (www.stuartwells.co.uk)

Dubina na kojoj će se pratiti podzemna voda tj. na kojoj se nalazi vodonosni sloj može premašiti dubinu do koje se može bušiti određenom tehnikom. Dalje, razni saturirani materijali pod velikim hidrostatskim pritiskom mogu ili 1) nametnuti povećani otpor (npr. glina koja može nabubriti) ili 2) dovesti do nestabilnih formacija (npr. pjeskoviti materijali), i na taj način smanjiti dubinu bušenja određenom metodom.
Materijal koji ćemo koristiti za izgradnju piezometara mora biti dovoljno čvrst da izdrži pritisak bušotine i da bude kemijski i fizički kompatibilan sa okolinom u kojoj će biti instaliran. Idealno, materijal bi trebao biti kemijski inertan u ovisnosti o vrsti polutanata koji će se pratiti. Cijev koja se koristi pri izradi piezometara je konstruirana od jednog od četiri materijala (Nielsen, Schalla, 1991.):

1. Termoplastični materijali, uključujući polivinil kloride (PVC) i akrilonitril-butadien stirel (ABS).
2. Metalni materijali, uključujući čelik sa niskim sadržajem ugljika, galvanizirani čelik, i nehrđajući čelik (tipovi 304 i 316).
3. Politetrafloroetilen (PTFE), poznat još pod trgovačkim imenom Teflon

4. Vlaknima pojačan polimer (FRE).

Svaki od navedenih materijala ima svojstva koja mogu biti prikladnija od ostalih za okolinske uvjete lokacije kao i za potrebe uzorkovanja podzemne vode.

2.3.2. Konstruiranje i položaj filtera na piezometru

Filtar predstavlja neki od različitih konstrukcijskih tipova perforirane cijevi koji se koristi da bi se omogućio doticaj vode u piezometar. Kod konstrukcije piezometarskog filtra, treba obratiti pozornost na tip filtera koji će biti ugrađen, ali isto tako i na njegov položaj u bušotini. Propisno instaliranje filtera je potrebno kako bi se osigurala voda bez sedimenata potrebna za uzorkovanje. Položaj i dužina filtra će odrediti da li ćemo uzimati uzorke iz tanke vertikalne zone ili ćemo uzimati uzorke iz šire vertikalne zone ispod površine. Kada su nam potrebni podaci o vertikalnoj distribuciji polutanata u podpovršinskom horizontu, piezometri su dizajnirani s manjom dužinom filtra s otvorima samo u ciljanim horizontima profila. Filteri male veličine i do 0,3 m mogu se koristiti za detaljna istraživanje onečišćenja. Filteri veličine od 1 do 3 m se koriste za karakterizaciju prosječne vertikalne distribucije onečišćenja na većem dijelu profila.

Nakon instalacije piezometra važno je zabrtviti bušotinu da bi se spriječilo procjeđivanje vode uz samu cijev i na taj način kontaminirali uzorci. Za tu svrhu se koriste materijali na bazi cementa i različiti tipovi bentonitne gline (Aller i sur. 1989.).
Treba biti oprezan prilikom samog brtvljenja zbog moguće kontaminacije lokacije, jer prilikom uporabe cementnih materijala možemo izmijeniti pH, jer takvi materijali imaju ph u granicama između 10 do 12. Bentonit je mineral gline koji se širi kad dođe u kontakt s vodom, nije tako krut kao cementni materijali pa se u njemu ne stvaraju pukotine sve dok je hidratiziran. Zbog toga se uglavnom koristi u dubljim slojevima bližim filteru. Bentonit nema tako alkalnu reakciju kao cement, no ima veliki kapacitet zamjene kationa, pa na taj način može utjecati na reprezentativnost uzoraka podzemne vode. Kako bi se spriječio u što većoj mjeri utjecaj gore navedenih materijala sa istraživanim dijelom profila, uz sam filter se ugrađuje šljunak, a iznad šljunka fini pijesak širine 0,3 – 0,6 m.

2.4. Modeliranje

Mnoge kemijske tvari koje se koriste u poljoprivrednoj proizvodnji mogu predstavljati ozbiljan problem ako se procjeđuju u dublje slojeve i podzemne vode. U posljednjih nekoliko godina sve veća pozornost pridaje se nesaturiranoj zoni tla jer se u toj zoni lakše mogu sanirati izvori onečišćenja prije nego dospiju u dublje vodonosne slojeve.

Tok podzemnih voda dijeli se na tok u saturiranoj sredini i na tok u nesaturiranoj sredini. Tok u nesaturiranoj sredini primarno je vertikalan, a tok u saturiranoj sredini primarno je horizontalan (Gjetvaj 2006.).

Pronos tvari kroz tlo usko je povezan s tokom vode između četice tla i stijena. Dio vode koja se ne vrati u atmosferu evapotranspiracijom (ET) i/ili površinskim otjecanjem (P_{out}) može se procijediti u dublje slojeve tla te konačno dospjeti u podzemnu vodu (saturiranu zonu). Kad je stalna razina podzemne vode blizu površine terena, dio podzemne vode iz saturirane zone može se kapilarnim dizanjem (K) vratiti u nesaturiranu zonu. Mnoge znanstvene discipline koje se bave proučavanjem procesa u okolišu često kao alat koriste razne matematičke modele kretanja (toka) vode u solumu tla. Modeli se mogu koristiti za istraživanje mnogih hidrogeoloških pojava. U posljednje vrijeme modeli se primjenjuju i pri utvrđivanju rizika zbog pronosa tvari (polutanata, onečišćivala) kroz tlo tokom vode (Mustać i sur., 2015.).

Prema Nuklearnoj regulatornoj komisiji (NRC, 1992.) matematički je model ''replika nekog objekta ili sustava iz stvarnog život''. Općenito gledajući, modeli su konceptualni opisi ili aproksimacije koje opisuju fizički sustav koristeći matematičke jednadžbe; modeli nisu točno egzaktni opisi nekog fizičkog sustava ili procesa (Kumar 2001.). Zahvaljujući tome što se matematički može predočiti pojednostavljena verzija nekog hidrogeološkoga sustava, modeli omogućuju predviđanje, testiranje i uspoređivanje razumnih alternativnih scenarija. Točnost ili primjenjivost samog modela ovisi o tome koliko matematičke formule mogu aproksimirati fizički sustav koji se modelirao. Također, točnost modela uvelike ovisi i o ispravnosti unesenih parametara potrebnih za rad modela te o stručnosti i razumijevanju materije one osobe koja ih unosi u model.

Modeli toka podzemne vode opisuju tečenje podzemne vode i pronos tvari, rabeći matematičke jednadžbe koje se zasnivaju na određenim pojednostavljenim pretpostavkama. Te pretpostavke obično uključuju smjer tečenja, geometriju vodonosnika (akvifera), heterogenost ili anizotropiju sedimenata unutar vodonosnika, mehanizme pronosa tvari, kemijske reakcije i sl. Modele treba shvaćati kao aproksimaciju, a ne egzaktnu kopiju stanja na terenu, zato što su u matematičke jednadžbe ugrađene pojednostavljene pretpostavke te zato što postoje mnogi ne potpuno "sigurni" podaci koje treba unijeti u model za njegov rad (Mustać i sur., 2015.).

2.4.1. Jednadžba toka podzemne vode i pronosa tvari u saturiranoj zoni tla

Proces izrade modela započinje formiranjem konceptualnog modela pri čemu se stvarni fizikalni sustav, u kojem je nemoguće opisati sve procese koji se odvijaju, zamjenjuje pojednostavljenim sustavom koji se može opisati matematičkim formulama, a koji se s inženjerskog stajališta dovoljno dobro opisuje procese koji se promatraju. Sljedeći korak jest opisivanje fizičkog sustava matematičkim izrazom. Jednadžba koja opisuje nestacionarni tok podzemne vode u anizotropnoj nehomogenoj sredini glasi (Gjetvaj 2006.):

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \frac{\partial h}{\partial z}\right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

gdje su : k_x, k_y, k_z – koeficijenti vodopropusnosti duž x, y, z osi,

h – piezometarska visina,

S_s – koeficijent specifičnog uskladištenja

2.4.2. Postavljanje modela

Postavljanje modela toka i pronosa tvari počinje prikupljanjem podataka o problemu radi dobivanja konceptualnog modela koji pokazuje kako prirodni sustav funkcionira s obzirom na dobivene podatke. Prirodni se sustav ne može potpuno konceptualizirati pa je od iznimne važnosti pravilno odrediti koji su podatci potrebni za izračun te samo njih unijeti u konceptualni model. Nakon prikupljanja i interpretacije podataka (konceptualnog modela) pristupa se postavljenju kompjutorskog modela. Podaci (inputi) uneseni u matematički model predstavljaju najbolju procjenu kako sustav funkcionira, ali u stvarnosti rezultati su relativno nesigurni. Zato se vrijednosti unesenih podataka prema potrebi prilagođavaju u procesu kalibracije modela (podatci se usklađuju da bi se najbolje opisali istraživani sustavi podzemnih voda). Kalibracija modela podrazumijeva iterativni postupak, postupno mijenjanje parametara uz pokretanje simulacije nakon svake promjene, sve dok se ne postigne zadovoljavajuće slaganje rezultata modela i mjernih vrijednosti pa se može reći da je kalibracija modela zapravo rješavanje inverznoga problema. Nakon kalibracije modela, model se pušta u rad i počinju se generirati rezultati potrebni za rješavanje određenog problema. Pri postavljanju modela svakako valja voditi računa o ispravnom određivanju hidrogeoloških obilježja predmetnog područja, o ispravnom odabiru podataka koji će se unijeti u konceptualni model i o ispravnom odabiru programa za modeliranje.

Odabrani računalni program za modeliranje treba simulirati uvjete koji su zatečeni na terenu. Sukladno tome, prema hidrogeološkim obilježjima i konceptualnom modelu odlučuje se da li se koristi 1-D, 2-D ili 3-D modele toka i pronosa tvari.

2.4.3. Modeliranje pronosa tvari u nesaturiranoj zoni tla

Modeli toka vode i pronosa tvari služe kao alati kojima se mogu opisati i predvidjeti specifični procesi u nesaturiranoj i saturiranoj zoni tla. Na primjer, različiti modeli mogu poslužiti za testiranje i provedbu pokusa na različitim tipovima tla, na uzgajanim kulturama, u primjeni gnojidbe i sredstava za zaštitu bilja, a sve radi zaštite tla i vode od onečišćenja. Modeli su isto tako potrebni za projektiranje ili sanaciju odlagališta otpada (industrijskih, gradskih ili za dugoročno zbrinjavanje raznih drugih vrsta otpada (npr. radioaktivni otpad). Velik broj modela razvijen je za simuliranje mnogobrojnih procesa koji mogu opisati jednostavnije i složenije biogeokemijske procese te se mogu koristiti u različite svrhe. U nesaturiranoj zoni tla postoji mogućnost eliminacije (razgradnje) i sanacije onečišćivala prije ispiranja u podzemne vodne resurse. Pronos tvari u tlu je usko povezano s tokom vode u nesaturiranoj zoni i u modeliranju pronosa tvari vrlo je važno procijeniti vodnu bilancu tla (tok vode) koja uvelike utječe na koncentraciju i biokemijske reakcije različitih supstancija. Pronos tvari u nesaturiranoj zoni tla jedan je od najkompleksnijih i najzahtjevnijih problema u numeričkom modeliranju (Filipović 2015).

2.4.4. Tok vode u nesaturiranoj zoni tla

U poglavlju 2.4.1. opisan je tok vode i prikazana je jednadžba toka podzemne vode u saturiranoj sredini, no prije opisa pronosa tvari u tlu potrebno je prikazati i opisa toka vode u nesaturiranoj zoni tla koji je mnogo kompleksniji nego što je u saturiranoj zoni tla. Iako postoji veliki broj modela koji se baziraju na različitim matematičkim rješenjima za simuliranje toka vode u nesaturiranoj zoni tla, većina modela bazira se na Richardsovoj jednadžbi toka vode (jednodimenzionalni tok u vertikalnom smjeru) :

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{K(h)\,\partial h}{\partial z} + \frac{\partial K(h)}{\partial z}\right) - S(h)$$

Gdje su : θ – relativna količina vode u tlu, [L^3L^{-3}],

h - vodni potencijal tla (*pressure head*), [L],

K – hiraulička provodljivost nesaturiranoga tla, [LT^{-1}],

z – vertikalna koordinata (pozitivan smjer prema gore), [L],

t – vrijeme, [T],

S – voda koju biljka usvaja korijenom, [T^{-1}]

Richardsova jednadžba bazira se na jednadžbi kontinuiteta i Darcyjevom zakonu. Jednadžba kontinuiteta izražava promjenu u relativnoj količini vode u zadanom volumenu tla, kao posljedici prostorne promjene toka vode. Darcyjev zakon primijenjen na djelomično saturirani tok opisuje hidrauličku provodljivost kao funkciju relativne količine vode u tlu K = K(θ), što znači da će malo smanjenje količine vode u tlu dovesti do signifikantnog smanjenja hidrauličke provodljivosti K (Filipović 2015).

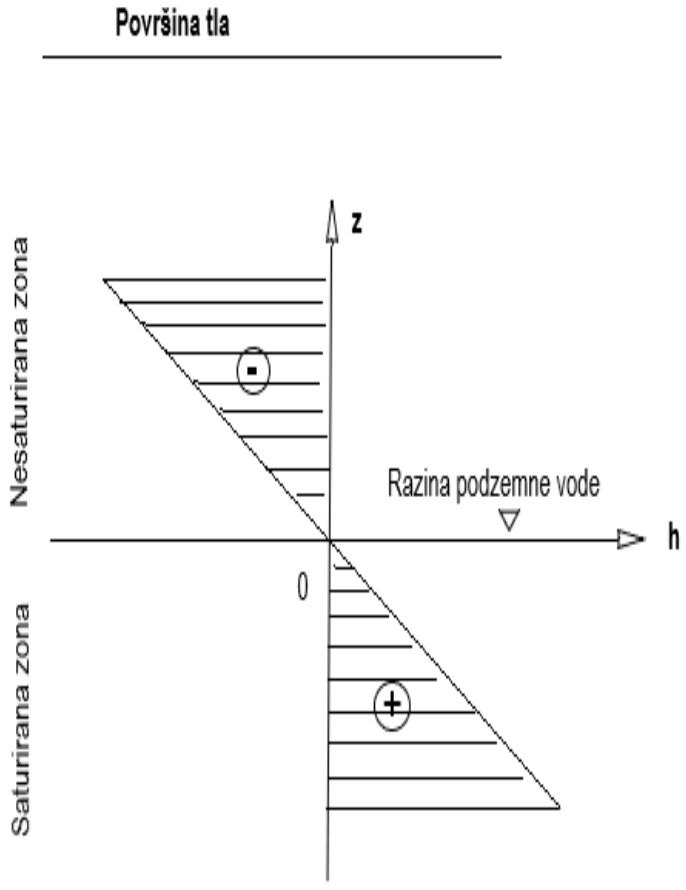
2.4.5. Prikaz važnijih modela pronosa tvari

Velik je broj programa koji se koriste za modeliranje toka vode i pronosa tvari u nesaturiranoj zoni tla. U nastavku su navedeni i ukratko opisani neki od najčešće korištenih programa za modeliranje toka i pronosa koje su primjenjivi za nesauturirane i djelomično saturirane uvjete. Softverski paket HYDRUS uključuje numeričke modele za jednodimenzionalni (1D), dvodimenzionalni (2D) ili trodimenzionalni (3D) (ne)saturirani tok vode i pronos tvari (HYDRUS-1D, HYDRUS-2D, HYDRUS-3D, Šimůnek, 1999., 2006.) analitičke metode za pronos tvari u tlu u podzemnoj vodi u sklopu programa CXTFIT (Toride i sur., 1995) i STANDMOD (Šimůnek i sur., 1999.) te alate (baza podataka) za analizu ili predviđanje hidrauličkih svojstava tla (RETC, van Genutchen i sur., 1991., Schaap i sur., 2001., ROSETTA, Schaap i sur., 2001. i UNSODA, Leij i sur., 1999.). Navedeni modeli obuhvaćaju veliki broj mogućnosti, od rješavanja relativno jednostavnih problema 1D pronosa tvari do rješavanja složenih problema višedimenzionalnog toka i pronosa tvari, uključujući niz biogeokemijskih reakcija (Filipović 2015).

Upotreba numeričkog modela HYDRUS-1D je uspješna za procjenu hidrauličkih parametara tla, optimizirajući vodu tla, kretanje otapala, te punjenja podzemnih voda. (Gogolev i sur., 2002., Bethune i sur., 2008., Jimenez-Martinez i sur., 2009., Mattern i sur., 2010.). Površinsko stanje tla je komplicirano za stjecanje točnih podataka kao što su evapotranspiracija, evaporacija tla i navodnjavanje te mogu uzrokovati neuspjeh modela (Lu i sur., 2011.). Odabirom dubine ispod zone ukorijenjenosti kao gornje granice modela s mjerenjem sadržaja vode tla i potencijala kroz duži period, može biti rješenje problema (Scott i sur., 2000.).

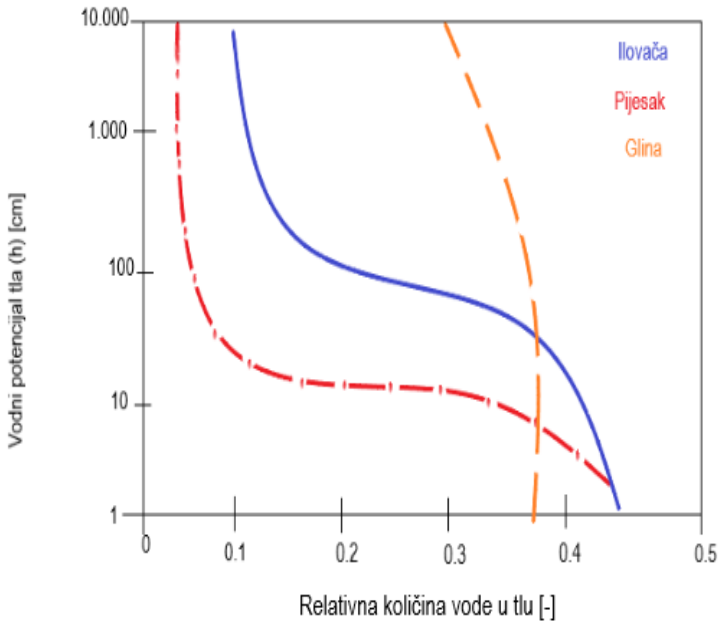
2.4.6. Hidraulička svojstva tla

Dva hidraulička parametra tla moraju biti poznata za rješavanje jednadžbe odnosno simuliranje toka vode u nesaturiranom tlu. To su relativna količina vode u tlu, tj parametri retencijske krivulje tla i hidraulička provodljivost nesaturiranog tla, tj parametri krivulje hidrauličke provodljivosti. Retencijske krivulje definirane su kao odnos između relativne količine vode u tlu i vodnog potencijala tla te imaju karakterističan odnos za različite tipove tla. Ukupni vodni potencijal tla reflektira energetski status tekućine (vode) u određenoj točki u poroznom sustavu (tlu). Mnogobrojne različite sile pridonose ukupnom potencijalu i na taj način utječu na tok vode u nesaturirnom tlu. Budući da su neke komponente ukupnog vodnog potencijala zanemarive u većini slučajeva, spomenut ćemo njegove najvažnije komponente: gravitacijski potencijal, osmotski potencijal i matrični potencijal. U praksi se najčešće koristi kombinacija matričnoga potencijala za nesaturiranu zonu uslijed razlika uz koncentraciji soli prisutnih u otopini tla (negativni predznak) s hidrostatskim tlačnim potencijalom za saturiranu zonu (pozitivan predznak) kao vodni potencijal tla (*h* - definiran jedinicom duljine) koji je onda primjenjiv za saturirane i nesaturirane uvjete (Filipović 2015.).



Slika 5. Odnos vodnog potencijala tla za nesaturirano i saturirano tlo gdje se ukupni potencijal tla može izraziti kao H = h + z

Retencijske krivulje tla predstavljaju odnos između relativne količine vode u tlu *θ* i vodnog potencijala tla *h*. Glavne karakteristike retencijske krivulje tla vidljive su iz slike 6, gdje je na osi x prikazana relativna količina vode u tlu *θ,* a na osi y prikazan je vodni potencijal tla *h*. Pri potencijalu blizu vrijednosti 0, tlo je gotovo saturirano i voda u tlu vezana je kapilarnim silama; kako se *θ*, smanjuje, sile vezane postaju sve jače (potrebna je jača sila za ekstrakciju vode iz tla), i kod malih potencijala (blizu granici točke venuća pF 4.2; - 15.000 cm) voda koja je zadržana u tlu nalazi se u najsitnijim porama tla.



Slika 6. Primjer retencijske krivulje tla za pijesak, ilovaču i glinu (prikazano prema hidrauličkim parametrima preuzetima od Carsel i Parish, 1988.)

Teksturno lakša tla (pjeskovita) gube vodu mnogo brže od teksturno težih tala (glina) kao izravan odraz distribucije veličine pora u tlu pri određenoj teksturnoj jedinici tla. Budući da većina pora u teksturno lakšim tlima ima veći promjer, voda će se procijediti kod malih negativnih potencijala tla, a u teksturno težih tala (glina, ilovača, praškasta ilovača) procjeđivanje vode događa se vrlo velikim vrijednostima negativnog vodnog potencijala. Oblik retencijske krivulje tla može se opisati primjenom različitih modela, od kojih je najčešće primjenjivan Genuchten – Mualem model.

Hidraulička provodljivost može se opisati kao sposobnost tla za prijenos (transport) vode kao i takva je inverzno povezana s otporom toka vode u tlu. Kao takva hidraulička se provodljivost smanjuje tijekom sušenja tla i sa smanjenjem volumena pora koje su ispunjene vodom. Hidraulička provodljivost u saturiranom tlu mnogo je veća u teksturno lakših tala (pijesak) nego u tlima glinovite ili ilovaste teksture. Važno je napomenuti da se hidraulička provodljivost drastično smanjuje kako tlo prelazi iz saturirane u nesaturiranu fazu. Navedeno smanjenje, kada je izraženo kao funkcija vodnog potencijala tla, mnogo je izraženije u pjeskovitih nego u ilovastih ili glinovitih tala (Filipović 2015.).

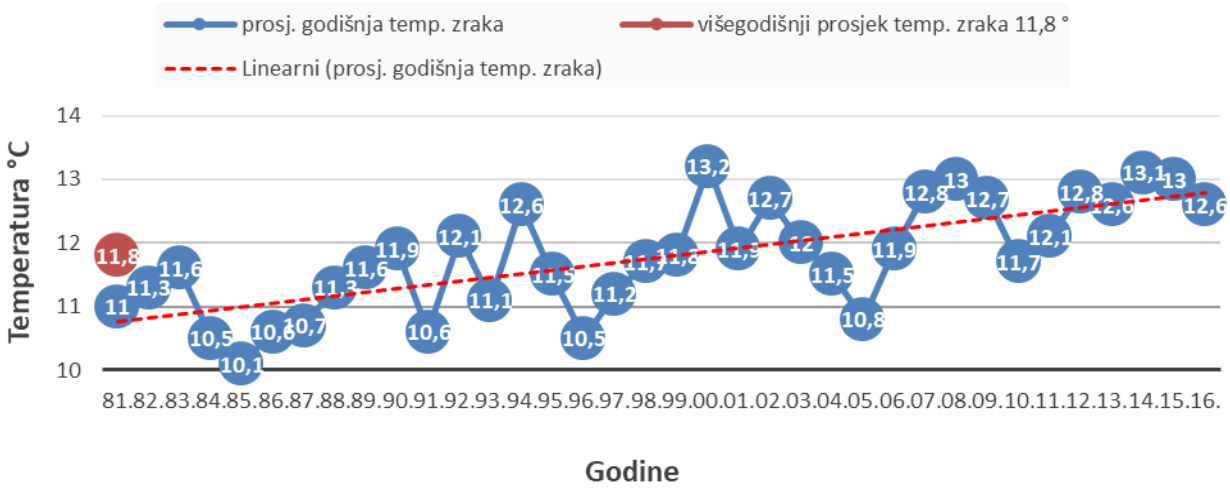
3. Cilj istraživanja

Cilj rada je utvrditi vodni režim nesaturirane zone tla uzimajući u obzir sezonske varijacije u razinama podzemne vode na pojedinim lokacijama hidromorfnih tala pomoću limnigrafskih i lizimetarskih opažanja te korištenjem numeričkog modeliranja.

4. Materijali i metode rada

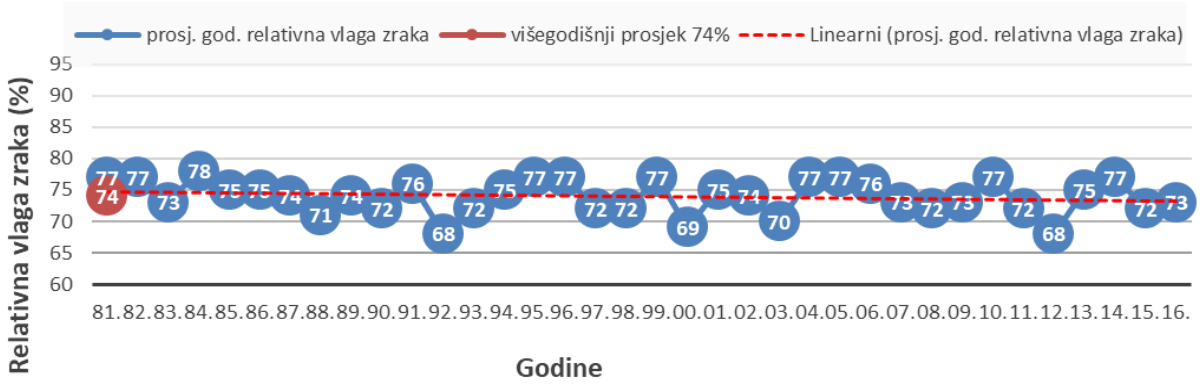
4.1. Klima i bilanca vode

Područje istraživanja nalazi se na prijelazu iz semiaridne u semihumidnu umjerenu kontinentalnu klimu (Petošić i sur., 2002.). Prosječna količina godišnjih oborina (za razdoblje od 1981. do 2016. godine) za m. p. Gradište, kod Županje je iznosila 682,7 mm dok na vegetacijsko razdoblje. Vrijednost srednje godišnje temperature zraka (za isto vremensko razdoblje) za m.p. Gradište kod Županje bila je 11,8°C. Prosječna vrijednost relativne vlage zraka (za razdoblje od 1981. do 2016. godine) za m.p. Gradište, kod Županje iznosila je 74%.



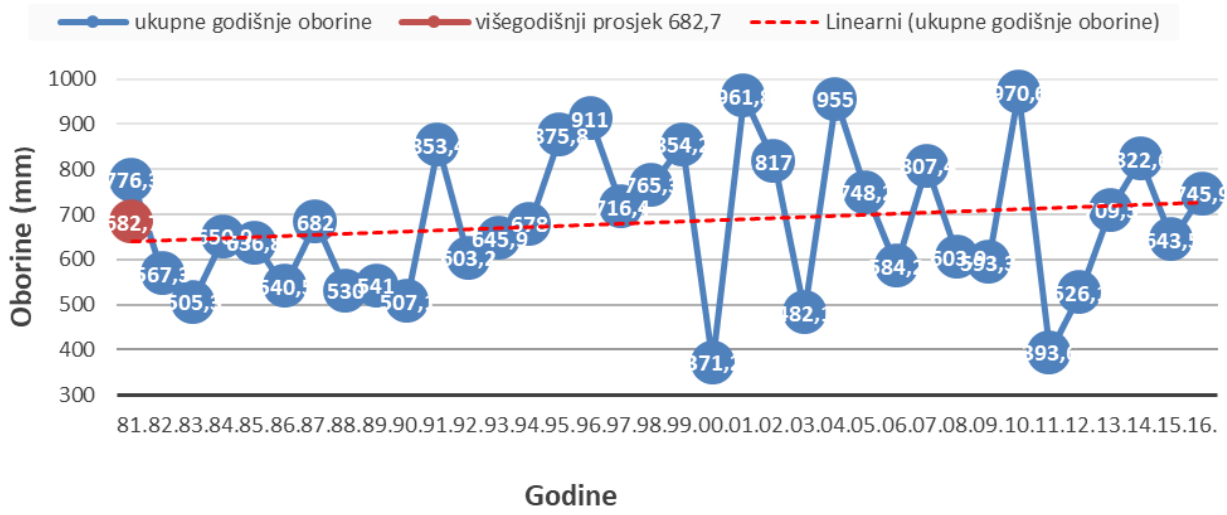
Slika 7. Dinamika prosječnih godišnjih temperatura zraka na području Gradišta (1981. – 2016.)

Najviša izmjerena prosječna temperatura iznosila je 13,2 C° u 2001. godine, dok je najmanja prosječna temperatura iznosila 10,1 C° u 1985. godini.



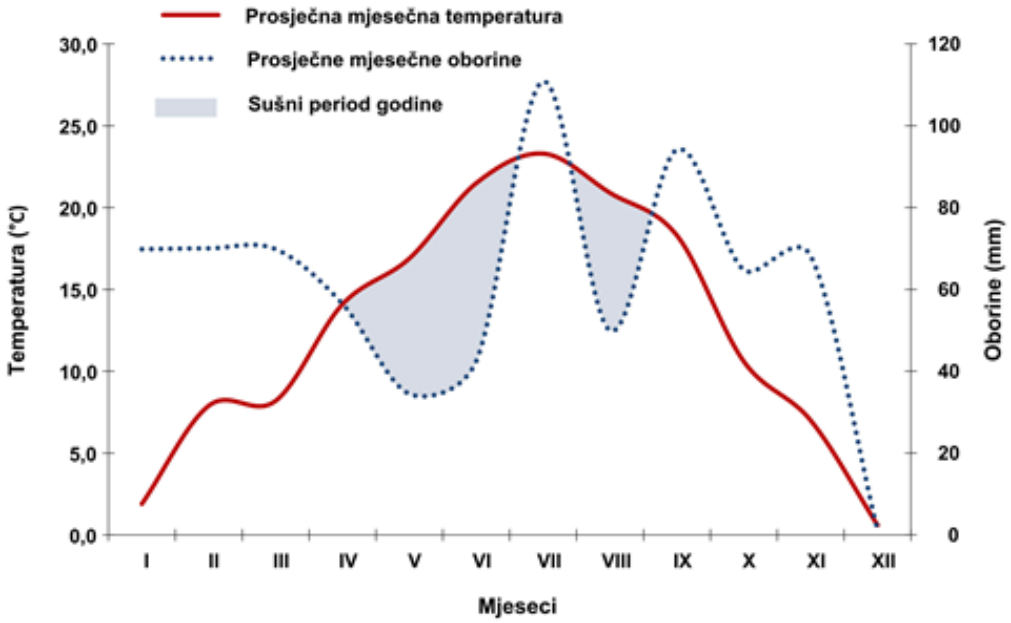
Slika 8. Dinamika prosječnih godišnjih vrijednosti relativne vlage zraka na području Gradišta (1981. – 2016.)

Najviša prosječna vlaga zraka bila je 78 % u 1984. godini, dok je najmanja iznosila 68 % i to 1992. i 2012. godine.

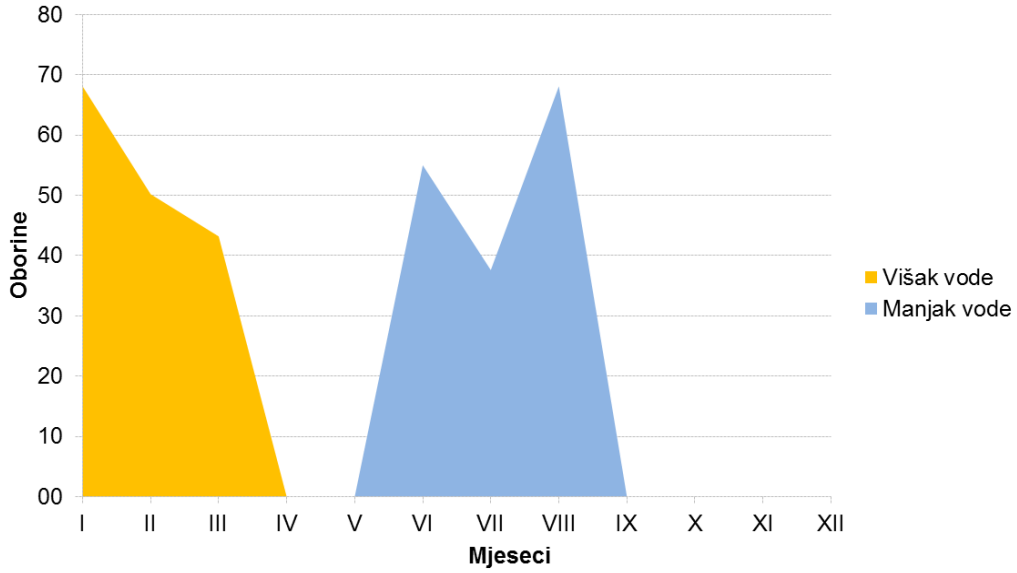


Slika 9. Dinamika ukupnih godišnjih oborina na području Gradišta, mm (1981. – 2016.)

Vidljivo je da je najviše oborina bilo 2011. i iznosilo je 970,6 mm, dok je najmanje oborina palo u 2012. godini i iznosilo je 371,2 mm.



Slika 10. Klimadijagram po Walteru za područje Gradišta koji nam pokazuje temperaturu, prosječne oborine kao i sušne periode po određenim mjesecima u godini (2016.)



Slika 11. Prikaz godišnjeg manjka i viška vode u prosječnom tlu (mm) tijekom 2016. godine, dobiven bilanciranjem po metodi Thornthweita

4.2. Značajke tla na istraživanim lokacijama

Monitoring poljoprivrednih tala na području dovodnog Melioracijskog kanala tijekom 2016. godine, lokacije motrenja, njihov smještaj, način korištenja te naziv tala, prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Monitoring poljoprivrednih tala na području dovodnog Melioracijskog kanala tijekom 2016. godine, klasifikacija je provedena prema Petošić i sur. (2010.)

Oznaka lokacija	Smještaj	Način korištenja tla (kultura)	Pedološki profil	Naziv pedosistematske jedinice
1.	Babina Greda-Kladavac	zob, uljana repica	P-1	hidromeliorirano drenažom iz hipoglejnog tla
2.	Babina Greda-Konjsko	pir	P-2	hidromeliorirano drenažom iz hipoglejnog tla
3.	Gundinci-Jasinje	ozimi ječam (stočni)	P-3	hidromeliorirano drenažom iz livadskog pseudooglejenog tla
4.	Gundinci-Dobrovo	uljana repica, ozimi ječam	P-4	močvarno glejno hipoglejno (djelomično hidromeliorirano)
5.	Gundinci-crpilište	ozimi ječam	P-5	hidromeliorirano drenažom iz amfigleja

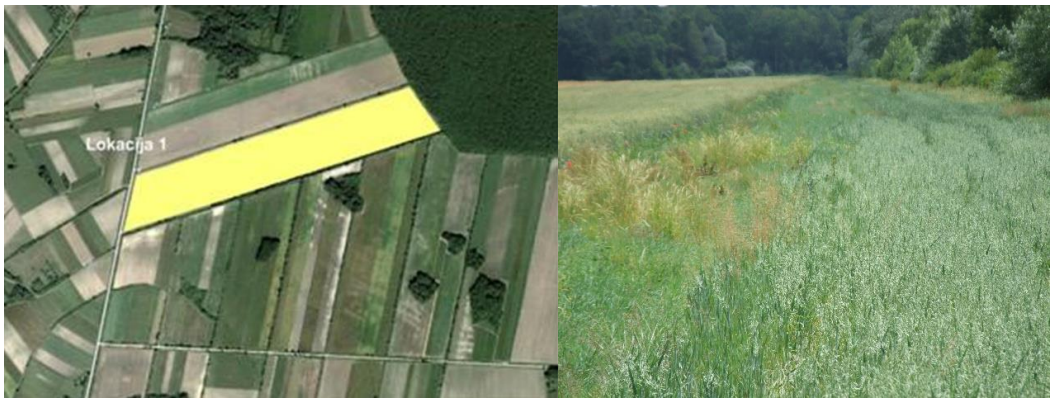
Lokacija 1. (Babina Greda-Kladavac)

Nalazi se uz cestu između naselja Babina Greda i Kladavac, odnosno na udaljenosti oko 3,75 km od Babine Grede u pravcu Kladavca. Lokacija je smještena na hidromelioriranoj proizvodnoj jedinici (tabli) veličine oko 30 ha. Tlo na ovoj lokaciji je hidromeliorirano drenažom iz močvarno glejnog, hipogleja. Osnovna kemijska svojstva tla na lokaciji 1 tijekom 2016. godine prikazana su u tablici 2.

Tablica 2. Osnovna kemijska svojstva tla na lokaciji 1 tijekom 2016. godine

Lokacija	Profil	Datum uzorkov.	Dubina	pH		Humus	N	mg / 100 g	
			cm	H_2O	1M-KCl	%	%	P_2O_5	K_2O
1.	**P-1**	21.09.	0-30	8,03	7,65	2,06	0,17	52,6	36,0
			30-60	8,00	7,60	1,99	0,14	14,5	20,3
		Prosjek	**0-60**	**8,01**	**7,62**	**2,02**	**0,15**	**33,5**	**28,2**

Temeljem pokazatelja u tablici 2. može se zaključiti da je tlo u površinskom horizontu od 0 – 30 cm dubine, na lokaciji 1 tijekom 2016. godine imalo osrednje alkaličnu reakciju u 1 M KCl-u (7,65). Sadržaj humusa je u površinskom horizontu iznosio oko 2,06 % (slabo humozno tlo). Opskrbljenost površinskog horizonta tla s dušikom (0,17 %) bila je dobra. Opskrbljenost tla s fiziološki aktivnim fosforom je bila 52,6 mg P_2O_5 / 100 g (vrlo bogata). Opskrbljenost kalijem je bila također, vrlo bogata (36,0 mg K_2O / 100 g tla).



Slika 12. Prikaz lokacije 1 (Babina Greda – Kladavac) s uzgajanom kulturom (zob) tijekom 2016. godine

Lokacija 2. (Babina Greda – Konjsko)

Smještena je na istom potezu između naselja Babina Greda – Kladavac. U odnosu na lokaciju 1, smještaj ove lokacije nalazi se oko 1,25 km dalje u pravcu sjeveroistoka, odnosno prema vodotoku Konjskom. Udaljenost lokacije 2 od ovog vodotoka iznosi oko 500 m. Trasa dovodnog Melioracijskog kanala prolazi sredinom područja, između lokacija 1 i 2. Lokacija 2 također, je smještena na hidromelioriranoj parceli površine oko 20 ha. U tablici 3 prikazana su osnovna kemijska svojstva tla tijekom 2016. godine.

Tablica 3. Osnovna kemijska svojstva tla na lokaciji 2 tijekom 2016. godine

Lokacija	Profil	Datum uzorkov.	Dubina	pH		Humus	N	mg / 100 g	
			cm	H_2O	1M-KCl	%	%	P_2O_5	K_2O
2.	P-2	21.09.	0-30	8,09	7,38	1,91	0,17	22,8	8,32
			30-60	7,96	7,30	1,65	0,15	11,1	5,40
		Prosjek	**0-60**	**8,02**	**7,34**	**1,78**	**0,16**	**16,9**	**6,86**

Temeljem navedenih pokazatelja u tablici 3 zapažamo da je obradivi horizont tla (0 – 30) na lokaciji 2 tijekom 2016. godine imao srednje alkaličnu reakciju s prosječnom vrijednošću pH u 1 M KCl-u od 7,38. Tlo je odgovaralo klasi slabo humoznih tala sa sadržajem humusa u površinskom horizontu od 1,91 %. Opskrbljenost tla s fiziološki aktivnim fosforom i kalijem tijekom 2016. god. je bila bogata i slaba (22,08 mg P_2O_5 / 100 g tla, 8,32 mg K_2O / 100 g tla). Opskrbljenost tla s dušikom je bila dobra (0,17 %).



Slika 13. Prikaz lokacije 2 (Babina Greda – „Konjsko“), s uzgajanom kulturom (pir) tijekom 2016. godine

Lokacija 3. (Gundinci – Jasinje)

Motrenje stanja tla na lokaciji 3, smješteno je na poljoprivrednoj parceli koja se nalazi u neposrednoj blizini asfaltne ceste Gundinci-Sikirevci. Lokacija 3 udaljena je od mjesta Gundinaca oko 2,0 km, a od kanala Jasinja oko 500 m, te stare farme "Jasinje-Sikirevci" oko 1000 m. Na parceli (tabli) na kojoj se vrši monitoring tla izvršeni su i hidromelioracijski zahvati blažeg intenziteta odvodnje (parcela je djelomično drenirana). Tlo na ovoj parceli (tabli) determinirano je kao hidromeliorirano drenažom iz livadskog pseudooglejenog tla. Osnovna kemijska svojstva tla tijekom 2016. godine na lokaciji 3 prikazana su u tablici 4.

Tablica 4. Osnovna kemijska svojstva tla na lokaciji 3 tijekom 2016. godine

Lokacija	Profil	Datum uzorkov.	Dubina	pH		Humus	N	mg / 100 g	
			cm	H_2O	1M-KCl	%	%	P_2O_5	K_2O
3.	P-3	21.09.	0-30	7,76	7,07	3,03	0,18	45,10	17,30
			30-60	7,20	7,01	1,76	0,12	16,20	12,20
		Prosjek	**0-60**	**7,48**	**7,04**	**2,39**	**0,15**	**30,65**	**14,75**

Analizom pokazatelja iz tablice 4 valja zaključiti da je na lokaciji 3 obradivi horizont tla tijekom 2016. godine imao praktično neutralnu reakciju, pri čemu je vrijednost pH u 1M KCl-u iznosila oko 7,07. Sadržaj humusa u površinskom horizontu (0 – 30 cm) je u prosjeku iznosio 3,03 % (dosta humozno tlo). Opskrbljenost tla dušikom bila je dobra (0,18 %). U istom horizontu tlo je bilo vrlo bogato opskrbljeno s fosforom (45,1 mg P_2O_5 / 100 g tla). Opskrbljenost tla s fiziološki aktivnim kalijem bila je dobra (17,3 mg K_2O / 100 g tla).



Slika 14. Prikaz lokacije 3 (Babina Greda – „Jasinje"), s uzgajanom kulturom (ozimi ječam-stočni) tijekom 2016. godine

Lokacija 4. (Gundinci – Dobrovo)

Oko 1500 m od mjesta Gundinaca u pravcu sjevero-istoka smještena je lokacija 4. Udaljenost lokacije 4 od vodotoka Dobrovo iznosi oko 250 m. Parcela na kojoj se vrši motrenje stanja tla djelomično je hidromeliorirana (jedan oblik nepotpune otvorene kanalske mreže). Tlo na ovoj lokaciji determinirano je kao močvarno glejno hipoglejno, mineralno. Osnovna kemijska svojstva tla na lokaciji 4 koja su utvrđena tijekom 2016. godine, prikazana su u tablici 5.

Tablica 5. Osnovna kemijska svojstva tla na lokaciji 4 tijekom 2016. godine

Lokacija	Profil	Datum uzorkov.	Dubina	pH		Humus	N	mg / 100 g	
			cm	H_2O	1M-KCl	%	%	P_2O_5	K_2O
4.	P-4	21.09.	0-30	6,93	5,90	1,80	0,17	24,5	8,34
			30-60	7,00	6,10	1,50	0,12	8,5	5,11
		Prosjek	**0-60**	**6,96**	**6,00**	**1,65**	**0,14**	**16,5**	**6,75**

Temeljem pokazatelja iz tablice 5 razvidno je dakle, da se tlo u površinskom horizontu (0-30 cm) tijekom 2016. godine odlikovalo: slabo kiselom reakcijom; slabom zastupljenošću organske tvari (1,80 %), dobrim sadržajem dušika (0,17%), bogatom opskrbljenošću s fosforom i slabom opskrbljenošću s kalijem (24,5 mg P_2O_5 / 100 g tla, i 8,34 mg K_2O / 100 g tla).



Slika 15. Prikaz lokacije 4 (Babina Greda – „Dobrovo“), s uzgajanom kulturom (uljana repica) tijekom 2016. godine

Lokacija 5. (Gundinci-crpilište)

Ova se lokacija nalazi neposredno uz cestu Gundinci-Sikirevci. Udaljenost ove lokacije od prethodno planiranog Crpilišta Babina Greda-Gundinci, odnosno od zdenca Z-1, iznosi oko 200 m. Tlo je hidromeliorirano drenažom iz amfigleja. Osnovna kemijska svojstva tla u površinskom horizontu 0-30 cm i podpovršinskom horizontu od 30 – 60 cm dubine tijekom 2016. godine prikazana su u tablici 6.

Tablica 6. Osnovna kemijska svojstva tla na lokaciji 5 tijekom 2016. godine

Lokacija	Profil	Datum uzorkov.	Dubina	pH		Humus	N	mg / 100 g	
			cm	H_2O	1M-KCl	%	%	P_2O_5	K_2O
5.	P-5	21.09.	0-30	7,05	6,28	2,76	0,19	38,4	19,1
			30-60	7,15	6,40	1,92	0,10	9,5	10,2
		Prosjek	**0-60**	**7,10**	**6,34**	**2,34**	**0,14**	**23,9**	**14,6**

Prema reakciji tla u 1M KCl-u (6,28) u površinskom, obradivom (0-30 cm) horizontu tijekom 2016. godine tlo je bilo slabo kiselo. Sadržaj humusa iznosio je oko 2,76 %, što odgovara klasi slabo humoznog tla. Tlo je u istom horizontu bilo dobro opskrbljeno s dušikom (0,19 %). Opskrbljenost tla s fiziološki aktivnim fosforom (38,4 mg P_2O_5 / 100 g tla) bila je vrlo bogata, a opskrbljenost s fiziološki aktivnim kaljem bila je dobra (19,1 mg K_2O / 100 g tla) (Mustać i sur., 2017).



Slika 16. Prikaz lokacije 5 (Gundinci - crpilište), s uzgajanom kulturom (ozimi ječam) tijekom 2016. godine

4.3. Način vlaženja tla

Hidropedološkim istraživanjima koja su detaljno interpretirana u studiji Petošić i sur. 2002. godine, izdvojeno je na širem području dovodnog Melioracijskog kanala i/ili donjeg toka budućeg VKDS-a, koje pedološki obuhvaća površinu od 11,315 ha, šest osnovnih načina vlaženja tala i to: aluvijalni, semiglejno-pseudoglejni, hipoglejni, humoglejni, amfiglejni i hidromeliorirani. Osnovne značajke načina vlaženja tala na istraživanom području prikazane su u tablici 7, pri čemu je procjena intenziteta dominantnog vlaženja s obzirom na zastupljenost tala vidljiva iz tablice 8 (Mustać i sur., 2017).

Tablica 7. Načini vlaženja tla na području dovodnog Melioracijskog kanala i/ili donjeg toka budućeg VKDS-a s obzirom na tip i podtip tla, klasifikacija prema Petošić i sur. (2010)

Dominantni način vlaženja tla unutar 2 m dubine			**Skraćeni naziv pedosistematske jedinice**
Tip	**Podtip**	**Režim vlažnosti**	
Aluvijalni	Srednje duboko oglejeni	Kolebajuće srednje duboke podzemne vode u zoni izravnog utjecaja vodotoka	Aluvijalno oglejeno
Livadsko/ pseudoglejni	Umjereno pseudoglejni i srednje duboko glejni	Vlaženje sporo procjednim površinskim vodama do cca 1 m, a dublje srednje dubokim podzemnim vodama	Livadsko, pseudooglejeno
Glejni	Hipoglejni	Prekomjerno vlaženje vrlo plitkim do plitkim podzemnim vodama	Hipoglej
Humoglejni	Plitko oglejeni	Vlaženje sporo procjednim i stagnirajućim te poplavnim površinskim vodama, a dublje plitkim jako kolebajućim podzemnim vodama	Humoglej
Glejni	Amfiglejni	Vlaženje sporo procjednim i stagnirajućim površinskim vodama, do 1 m, a dublje srednje dubokim podzemnim vodama	Amfiglej
Hidromeliorirani	Detaljno (otvoreni kanali + cijevna drenaža)	Zadovoljavajuća regulacija viška površinskih i podzemnih voda	Hidromeliorirano

4.4. Kalibracija i optimizacija hidrauličkih parametara tla

Numeričke simulacije toka vode i pronosa nitrata u ovom izvješću provedene su na tri pedosistematske jedinice tla u kojima su postavljeni procjedni lizimetri. Pedosistematske jedinice tla su klasificirane kako slijedi: Močvarno glejno, hipoglejno, mineralno, nekarbonatno tlo (Horizonti: P-Gso-Gr) na lokacijama 1, 2; Semiglejno, nekarbonatno, pseudoglejno, glinasto ilovasto tlo (Horizonti: P-C(g)-Gso) na lokaciji 3; Močvarno glejno, amfiglejno, mineralno, vertično, karbonatno tlo (Horizonti: P-Gr-Gso-Gr) na lokacijama 4 i 5. Na navedenim lokacijama izvršene su detaljne fizikalne i kemijske analize uzoraka tla. U tablici 8 navedeni su teksturni sastav tla, kapacitet tla za vodu, volumna gustoća, hidraulička vodljivost saturiranog tla i retencija vode pri različitim tlakovima u različitim horizontima (Mustać i sur., 2017).

Tablica 8. Prikazuje teksturni sastav tla, kapacitet tla za vodu, volumna gustoća, hidraulička vodljivosti i retencija vode u tlu za svih 5 lokacija.

Lokacije	Dubina (cm)	Pijesak %	Prah %	Glina %	Relativni kapacitet tla za vodu ($cm^3\ cm^{-3}$)	Volumna gustoća tla g cm^{-3}	Hidraulička vodljivost cm dan^{-1}	Retencija vode pri tlaku (kPa):		
								33	625	1500
1	**0-40**	13	65	22	0,38	1,59	11	0,34	0,22	0,20
	40-75	4	63	33	0,37	1,57	15	0,34	0,22	0,20
	75-105	14	54	32	Nije mjereno					
	105-200	5	69	26						
2	**0-30**	9	67	24	0,36	1,56	17	0,33	0,17	0,16
	30-75	2	61	37	0,37	1,55	12	0,39	0,31	0,28
	75-130	8	72	20	Nije mjereno					
	130-200	13	69	18						
3	**0-40**	6	60	34	0,37	1,49	14	0,35	0,22	0,19
	40-90	6	60	34	0,38	1,55	9	0,34	0,22	0,19
	90-130	6	63	31	Nije mjereno					
	130-200	10	67	23						
4	**0-25**	3	56	41	0,40	1,47	12	0,41	0,32	0,29
	25-80	2	57	41	0,41	1,46	10	0,35	0,22	0,20
	80-110	4	64	32	Nije mjereno					
	110-200	5	69	26						
5	**0-30**	5	54	41	0,42	1,37	12	0,39	0,28	0,22
	30-70	3	54	43	0,41	1,55	14	0,37	0,27	0,21
	70-150	3	54	43	Nije mjereno					
	150-200	3	54	43	Nije mjereno					

4.5. Uzgajane kulture i gnojidba

Tijekom istraživanog razdoblja na lokacijama postavljenih lizimetara uzgajane su različite ratarske kulture uz primjenu standardnih agrotehničkih mjera koje se primjenjuju u konvencionalnoj ratarskoj poljoprivrednoj proizvodnji šireg područja istočne Slavonije. Glavne uzgajane kulture tijekom istraživanog razdoblja bile su: zob (*Avena sativa*, lokacija 1), uljana repica (*Brassica napus*, lokacije 1 i 4), pir (*Triticum spelta* L., lokacija 2), ozimi ječam (*Hordeum vulgare*, lokacije 3, 4 i 5) (Mustać i sur., 2017.).

4.6. Vrijednosti potencijalne evapotranspiracije na području Melioracijskog kanala

Potencijalna evapotranspiracija izračunata je na temelju klimatskih podataka s meteorološke postaje Gradište za 2016. godinu. Evaporacija s površine tla i transpiracija biljaka izračunata je na dnevnoj bazi primjenom programa CROPWAT (Smith 1991.) koji se bazira na Penman-Monteithovoj jednadžbi:

$$ET_0 = \frac{0{,}408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+28} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma\,(1 + 0{,}34 u_2)} \qquad (4.1)$$

U navedenoj jednadžbi ET_0 je potencijalna evapotranspiracija [mm dan^{-1}], Rn je neto radijacije na površini kulture [MJ m^{-2} dan^{-1}], G je indeks topline tla [MJ m^{-2} dan^{-1}], T je temperatura zraka na 2 m n.m. [°C], u_2 je brzina vjetra na 2 m n. m. [m s^{-1}], e_s je saturirani vlak vodene pare [kPa], e_a je stvarni tlak vodene pare [kPa], e_s-e_a označava razliku saturiranog i stvarnog tlaka pare [kPa], Δ označava nagib tlačne krivulje [kPa °C^{-1}], a γ je psihrometrijska konstanta [kPa °C^{-1}]. Na temelju standardnih vrijednosti evapotranspiracije u različitim razdobljima godine ili različitim područjima mogu se izračunati vrijednosti stvarne evapotranspiracije za različite kulture. Uz primjenu dodatnih podataka o uzgajanoj kulturi (dubini zakorjenjavanja, visina biljke i indeks lisne površine) dobivene su vrijednosti transpiracije za svaku pojedinu kulturu po lokacijama motrenja (1-5).

4.7. Matematički opis toka vode i transporta onečišćivala

Za simulaciju toka vode i transporta onečišćivala (nitrata) korišteni su programski paketi HYDRUS-1D i HYDRUS-2D. Za simuliranje toka vode u jednodimenzionalnoj ravnini korištena je Richardsova jednadžba za Darcyjev tok vode u (ne)saturiranom poroznom mediju:

$$\frac{\partial\theta(h)}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z} - S(h) \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial\theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[K(h)\frac{\partial h}{\partial z} + K(h)\right] - S(h) \quad (4.3)$$

pri čemu θ predstavlja relativnu količinu vode u tlu [L^3L^{-3}], h je vodni potencijal tla [L], K je hidraulička vodljivost nesaturiranog tla [LT^{-1}], z je vertikalna koordinata (pozitivan smjer prema gore) [L], t je vrijeme [T], a S predstavlja vodu koju bilja usvaja [T-1].

Odnos hidrauličkih parametara tla su opisani pomoću van Genuchten-Mualem modela (van Genutchen, 1980.):

$$\theta(h) = \theta r + \frac{\theta s - \theta r}{(1+|\alpha h|^n)^m} \quad \text{for h<0} \quad (4.4)$$

$$\theta(h) = \theta s \; for \; h \geq 0 \quad (4.5)$$

$$K(h) = K_s S_e^l (1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m}})^m)^2 \quad (4.6)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4.7)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n}; \quad \text{n>1} \quad (4.8)$$

gdje je $\theta(h)$ relativna količina vode u tlu [L^3 L^{-3}], $K(h)$ je hidraulička vodljivost nesaturiranog tla [L T^{-1}] pri određenom vodnom potencijalu tla h (L), θ je relativna volumna količina vode u tlu, θ_r predstavlja relativnu rezidualnu količinu vode u tlu, a θ_s predstavlja relativnu količinu vode u tlu u uvjetima potpune saturacije [L^3 L^{-3}]. S_e je efektivna saturacija tla, K_s je hidraulička vodljivosti saturiranog tla [L T^{-1}], parametar α predstavlja inverznu vrijednost ulaza tlaka zraka [L^{-1}], n je indeks distribucije pora u tlu, m je koeficijent optimizacije i l je parametar povezanosti pora u tlu.
Količina vode u tlu u uvjetima potpune saturacije, θ_s, određena je laboratorijski, ostali parametri koji opisuju oblik retencijske krivulje (α i n) optimizirani su tijekom kalibracije modela pomoću programa RETC (van Genuchten, 1991.). Hidraulička vodljivost nesaturiranog tla optimizirana je na temelju θ_s, θ_r, i n vrijednosti, izmjerenih podataka o hidrauličkoj vodljivosti tla u saturiranim uvjetima K_s i pomoću faktora povezanosti pora, l, koji ima jednaku vrijednost za većinu tipova tala (l=0.5) (Mualem, 1976).

Validacija modela provedena je uz primjenu koeficijenta determinacija R^2:

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N}(O_i-\bar{O})(P_i-\bar{P})}{\left[\sum_{i=1}^{N}(O_i-\bar{O})^2\right]^{0,5}\left[\sum_{i=1}^{N}(P_i-\bar{P})^2\right]^{0,5}}\right] \quad (4.9)$$

gdje je: O_i – opažanje;

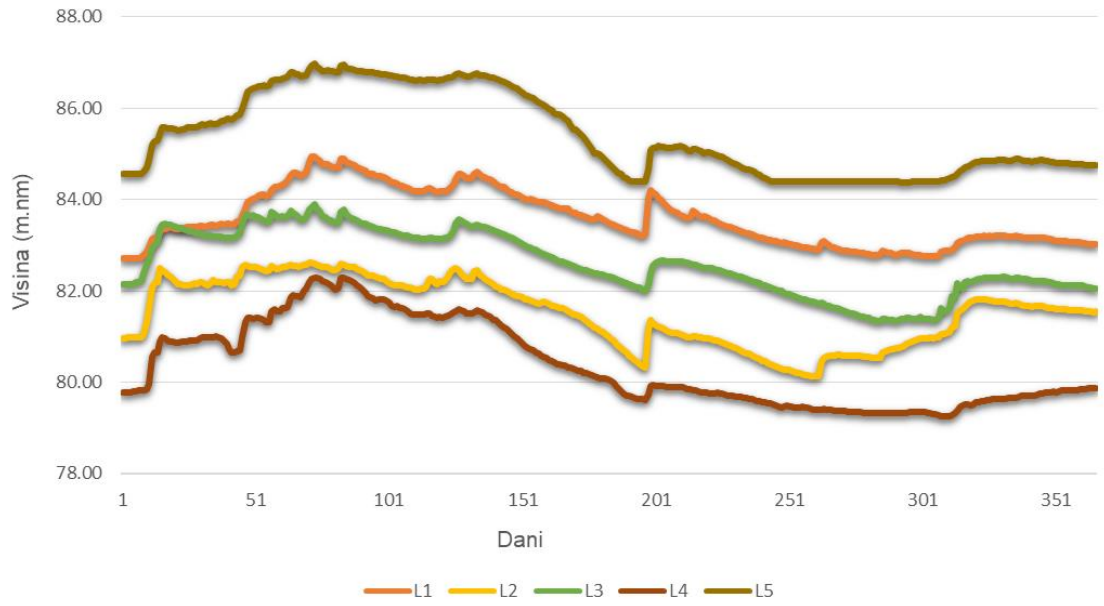
P_i - predikcija;

$\bar{O}$ - prosječno opažanje;

$\overline{P}$ – prosječna predikcija.

5. Rezultati i rasprava

Oscilacije podzemnih voda varirale su ovisno o mjesecima u godini i lokaciji na kojoj je bila mjerena razina podzemne vode. Iz slike 17. je vidljivo da je razina podzemne vode bila visoka u prvoj polovici godine, te se dolaskom u ljetne periode smanjivala, što ukazuje na to da je količina oborina u tom periodu bila izrazito niska. Podzemna voda se kretala od minimalnih 79 m.nm koji su bili izmjereni na lokaciji 4, te sve do maksimalnih 87 m.nm koji su bili izmjereni na lokaciji 5. Vidljivo je iz slike 17 da se na svih 5 lokacija razina podzemne vode smanjila oko 200-og dana, što bi odgovaralo kraju 6-og i početku 7-og mjeseca, tj početku ljetnih perioda, kojeg karakterizira mala količina oborina. Razina podzemne vode je ostala relativno niska sve do 300-og dana, što bi odgovaralo vremenu od kraja 9-og i početku 10-og mjeseca, tj povećanjem količine oborina tijekom jesenskog razdoblja.



Slika 17. Prikaz razina podzemne vode mjerene na pet ispitivanih lokacija u 2016. godini

Tijekom razdoblja istraživanja (2002. - 2006.) koje su provodili Petošić i sur. (2002.) utvrđeno je godišnje kolebanje razine podzemne vode koje pokazuju izraženu pravilnost po sezonama. Slične rezultate dobili su i su Pušić i Škorić (1965.) te Dolanjski i sur. (1999.) u dolini Save.

Nadalje, Wu i sur. (2016.) željeli su otkriti koliko je prosječno punjenje podzemnih voda koristeći HYDRUS-1D za modeliranje. Postavljanjem gornje granice na dubinu od 1,4 m dobio se rezultat da je prosječna vrijednost punjenja razina podzemne vode iznosio 225 mm godišnje od 2003. do 2007. Rezultatom je također ustanovljen pozitivan odnos između napunjene podzemne vode, sume irigacije i oborina koji su prikazani na vremenskoj i prostornoj skali.

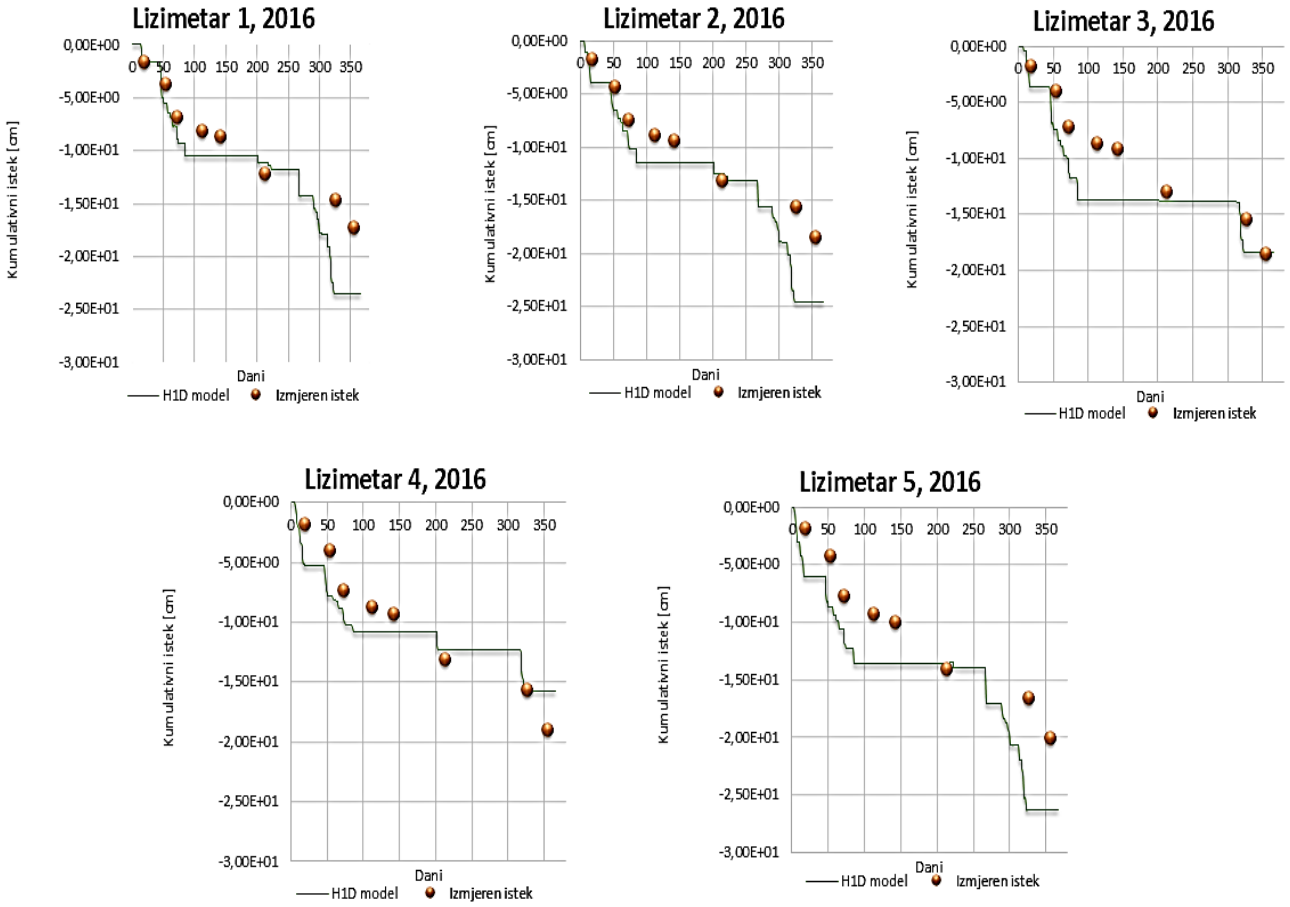
Optimizacija i kalibracija hidrauličkih parametara tla izvršena pomoću Rosetta programa na temelju pedotransfernih karakteristika tla (teksturni sastav, tablica 9). Rezidualna količina vode u tlu postavljena je kao 0 na svim pedosistematskim jedinicama tla, no iz dobre podudarnosti rezultata optimizacije potvrđen je njen mali utjecaj na ukupnu retenciju vode u tlu. Iz rezultata kalibracije je vidljivo da je hidraulička vodljivost tla na svim lokacijama bila relativno niska (do 9 cm/dan). Najviša je bila na lokaciji 2 na dubini od 130-200 cm, dok je najniža bila na dubini od 40-90 cm na lokaciji 3. Na svih 5 lokacija vrijednost hidrauličke vodljivosti je bila jako slična, kretala se od minimalnih 9cm/dan do maksimalnih 16 cm/dan. Hidraulička vodljivost u nesaturiranim uvjetima jako je varijabilan parametar uz velike oscilacije na malom prostoru te je kalibracija navedenog parametra standardan postupak (Coquet i sur., 2005.).

Tablica 9. Prikaz vrijednosti optimiziranih parametara koji su se koristili u numeričkim simulacijama kao i parametri dobiveni laboratorijskim metodama (θ_s, K_s).

-	Dubina (cm)	θ_s ($cm^3\ cm^{-3}$)	θ_r ($cm^3\ cm^{-3}$)	K_s ($cm\ dan^{-1}$)	α (cm^{-1})	n
1	0-40	0,38	0,0	11	0,00261	1,18
	40-75	0,37	0,0	15	0,00263	1,17
	75-105	0,47	0,09	12,22	0,008	1,51
	105-200	0,47	0,08	10,61	0,0068	1,57
2	0-30	0,36	0,0	17	0,0018	1,26
	30-75	0,37	0,0	12	0,00017	1,25
	75-130	0,46	0,08	13,73	0,0058	1,62
	130-200	0,45	0,07	16,41	0,005	1,65
3	0-40	0,37	0,0	14	0,00158	1,20
	40-90	0,38	0,0	9	0,00285	1,18
	90-130	0,47	0.09	12,57	0,0058	1,60
	130-200	0,45	0,08	12,57	0,0058	1,60
4	0-25	0,45	0,08	13,35	0,0054	1,62
	25-80	0,48	0,09	10,53	0,0086	1,50
	80-110	0,47	0,09	12,22	0,008	1,51
	110-200	0,47	0,08	10,61	0,0068	1,57
5	0-30	0,42	0,0	12	0,00136	1,20
	30-70	0,41	0,0	14	0,00212	1,17
	70-150	0,51	0,10	12,76	0,0121	1,41
	150-200	0,51	0,10	12,76	0,0121	1,41

Kumulativne vrijednosti količine procjedne vode u 2016. godini izmjerene na pojedinim lizimetrima i prikazane simulirane vrijednosti pomoću HYDRUS-1D prikazane su na slici 18. Simulacije su provedene u trajanju od 366 dana na 5 lizimetara te je vidljivo

da je najveća količina procijeđene vode izmjerena na početku i na kraju godine kada je količina oborina bila veća i kada nisu bile uzgajane poljoprivredne kulture na površinama. U sredini godine količina procijeđene vode je bila manja s obzirom da su se određene kulture uzgajale na pojedinim lokacijama, te je i količina oborina bila manja nego početkom i krajem godine.



Slika 18. Izmjerene i simulirane kumulativne vrijednosti procjedne vode iz lizimetara u 2016.godini pomoću HYDRUS-1D

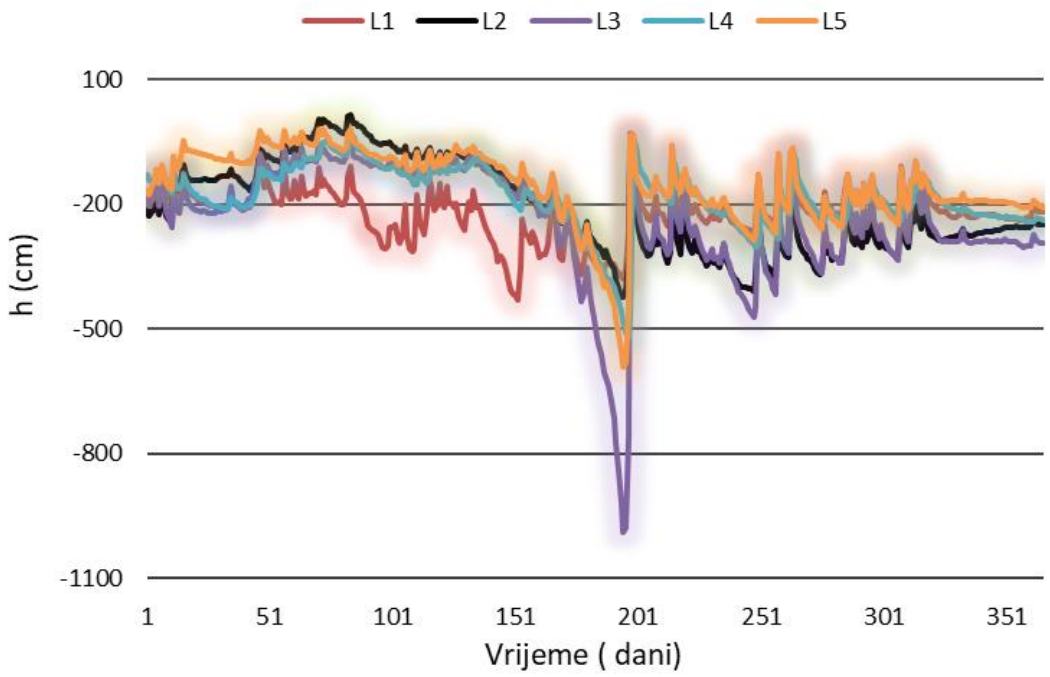
Korištenjem HYDRUS modela Filipović i sur. (2013.) dobili su slične rezultate, gdje su provodili istraživanje tijekom razdoblja 2007. - 2010. za procjenu toka vode u lizimetrima koristeći HYDRUS-2D. HYDRUS-2D model je omogućio da se u određenoj mjeri prikaže protok vode. Učinkovitost lizimetara je bila slaba u vegetacijskom razdoblju kada je biljka imala veliku potrebu za vodom. Do toka vode kroz lizimetre dolazilo je kad je količina oborina bila visoka te također kada je razina podzemne vode bila visoka. Iz tablice 10 je vidljivo da su tijekom razdoblja validacije modela na temelju lizimetarskog isteka dobiveni visoki koeficijenti determinacije (R^2>0,87) što ukazuje na dobru pouzdanost primijenjenog modela. Nakon validacije je provedeno modeliranje uz primjenu podataka sa limnigrafskh postaja (na dnevnoj rezoluciji) koji su bili

zabilježeni na svakoj lokaciji. U nastavku slijede rezultati utjecaja podzemnih voda na vodni režim (vodni potencijal i relativnu količinu vode u tlu) na pojedinim lokacijama.

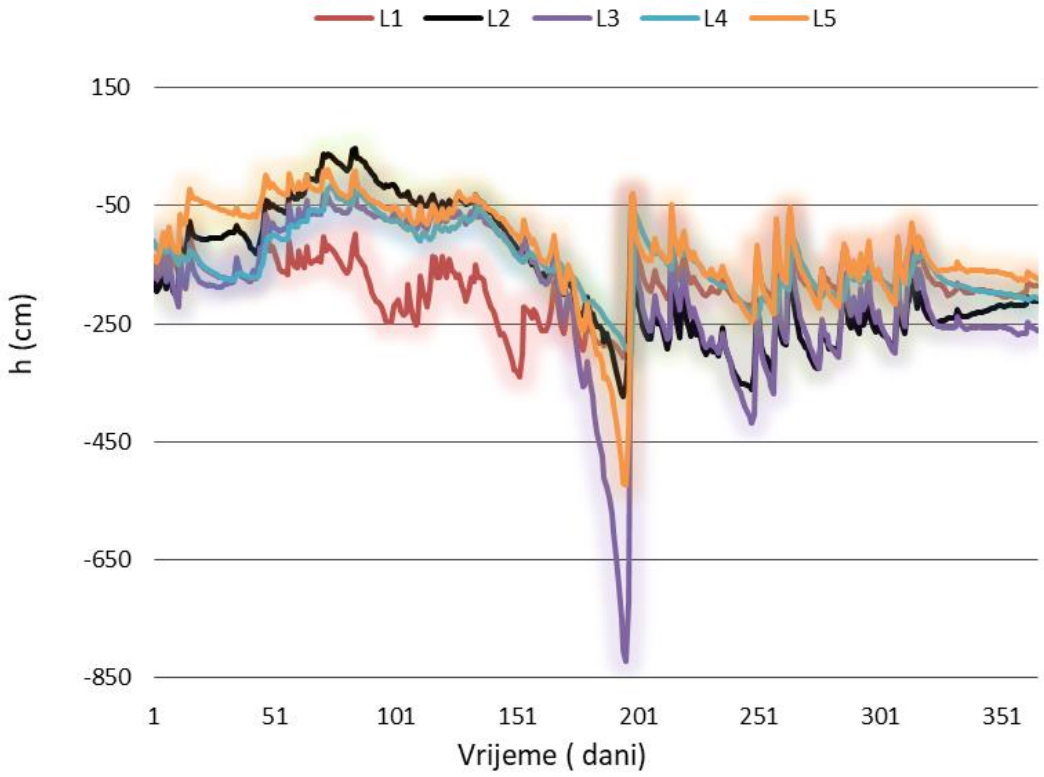
Tablica 10. Prikaz iznosa koeficijenta determinacije za svih pet lokacija.

Lizimetri	L1	L2	L3	L4	L5
R^2	0,90	0,89	0,90	0,96	0,87

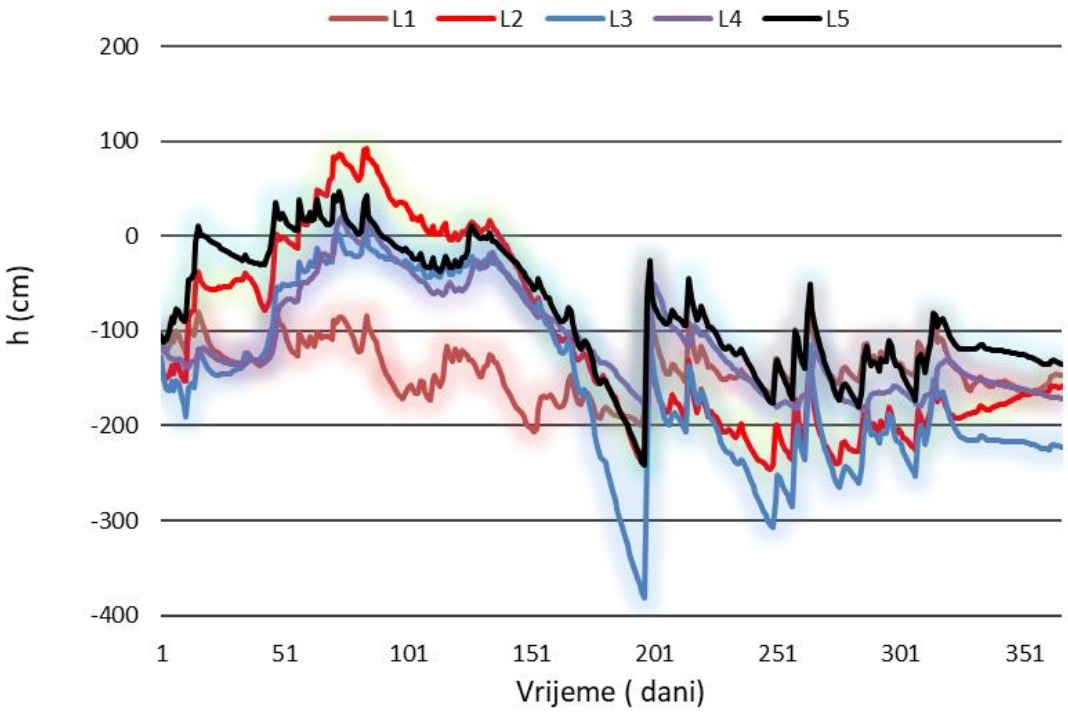
Grafovi vodnog potencijala tla (h) pokazuju kako je vodni potencijal bio nizak što je posljedica niske razine podzemnih voda i nedostatka oborina. U dubljim slojevima tla negativna vrijednost se smanjivala te se zaključuje da je tu već bila prisutna podzemna voda (slike 19 - 22). Na lokaciji 3 (Gundunci - Jasinje) izmjerena je najmanja vrijednost vodnog potencijala na svim dubinama mjerenja, dok je lokacija 2 (Babina Greda - Konjsko) imala izmjerenu najveću vrijednost vodnog potencijala. Na svih 5 lokacija vidljivo je veliko smanjenje vodnog potencijala tla u površinskom horizontu tla dolaskom do 200-og dana, tj dolaskom u ljetne periode, što je posljedica nedostatka oborina te niske razine podzemne vode. Dolaskom u jesenski period vrijednost vodnog potencijala se povećavala, što bi značilo da je količina oborina bila veća te da je razina podzemne vode također bila viša.



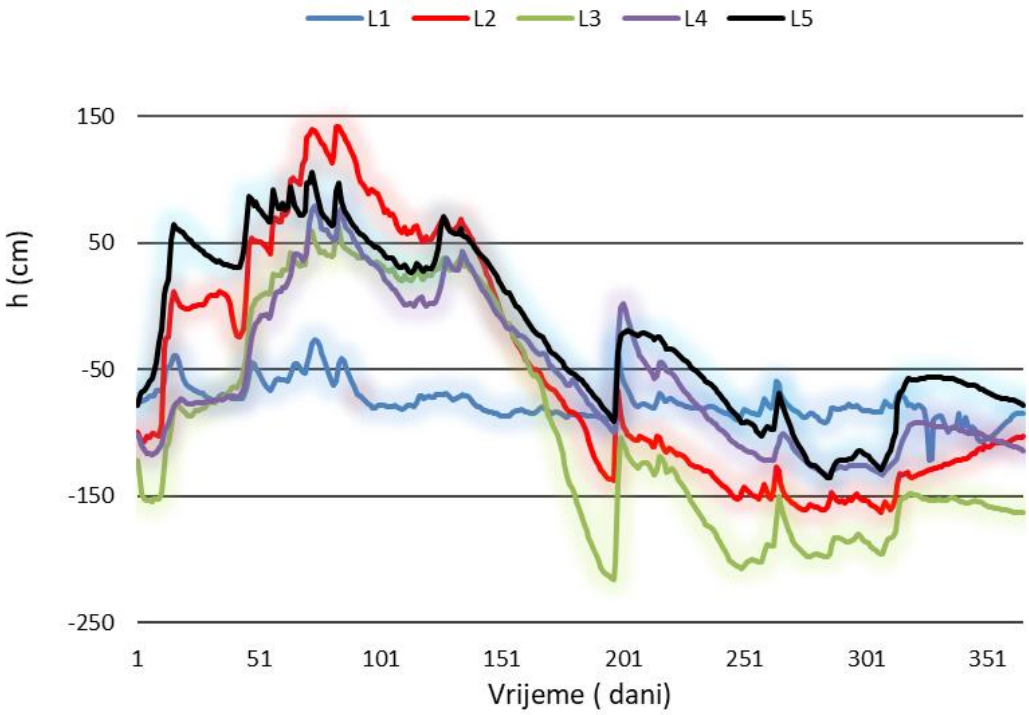
Slika 19. Prikaz vodnog potencijala tla (h) simuliran pomoću hydrus-1D mjeren tijekom 2016 godine, mjeren na dubini od 20 cm.



Slika 20. Prikaz vodnog potencijala tla (h) simuliran pomoću hydrus-1D mjeren tijekom 2016 godine, mjeren na dubini od 50 cm.

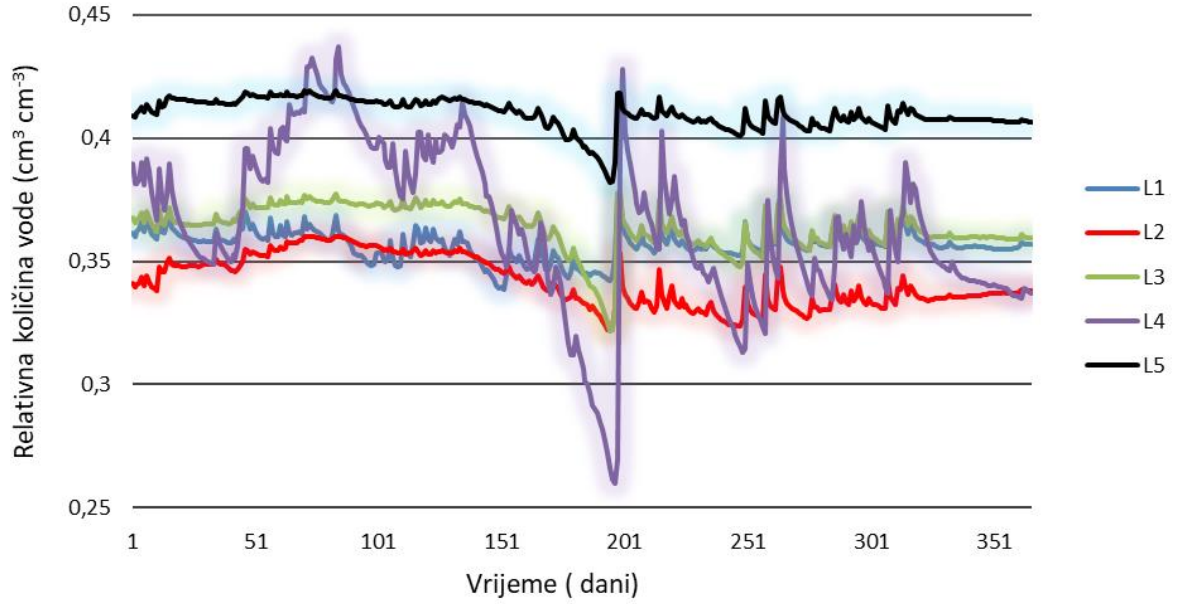


Slika 21. Prikaz vodnog potencijala tla (h) simuliran pomoću hydrus-1D mjeren tijekom 2016 godine, mjeren na dubini od 90 cm.

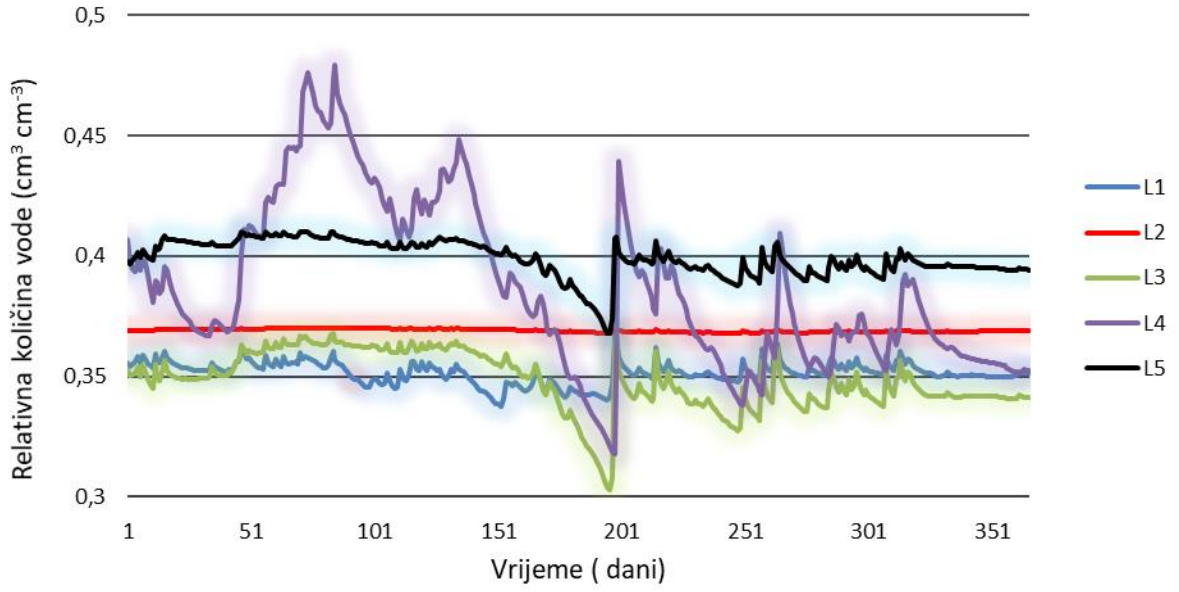


Slika 22. Prikaz vodnog potencijala tla (h) simuliran pomoću hydrus-1D mjeren tijekom 2016 godine, mjeren na dubini od 150 cm.

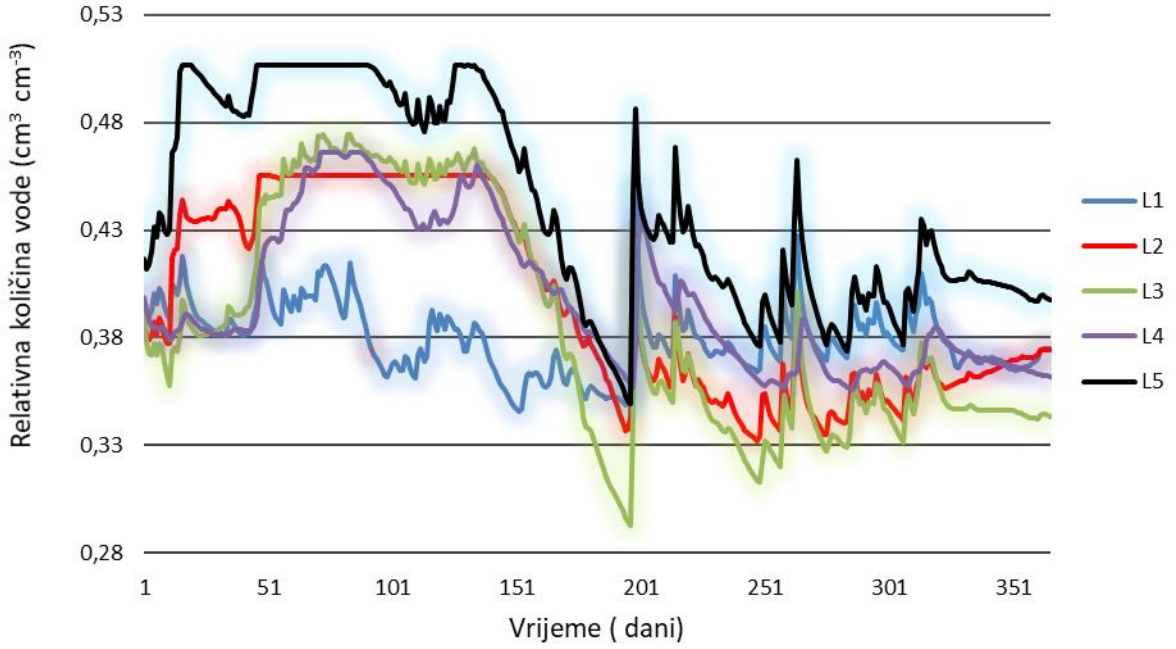
Relativna količina vode kretala se u intervalu od minimalnih 0,25 cm^3 cm^{-3} do maksimalnih 0,55 cm^3 cm^{-3} (slike 23-26). Vidljivo je da je razina podzemne vode na dubini od 20 cm bila najviša na lokaciji 4, te je također na lokaciji 4 bila i najmanja izmjerena razina vode. Na dubini mjerenja od 150 cm, na lokaciji 5 je prisutna potpuna saturacija tla (maksimalni kapacitet), što upućuje na to da se vjerojatno na toj razini nalazi podzemna voda. Iz slika (23-26) vidljivo je smanjenje relativne količine vode u tlu na svih 5 lokacija dolaskom u ljetne periode, što bi bilo povezano s nedostatkom količine oborina u tom periodu. Dolaskom u jesenski period, vrijednosti količine vode u tlu su se povećale u skladu s povećanjem količine oborina.



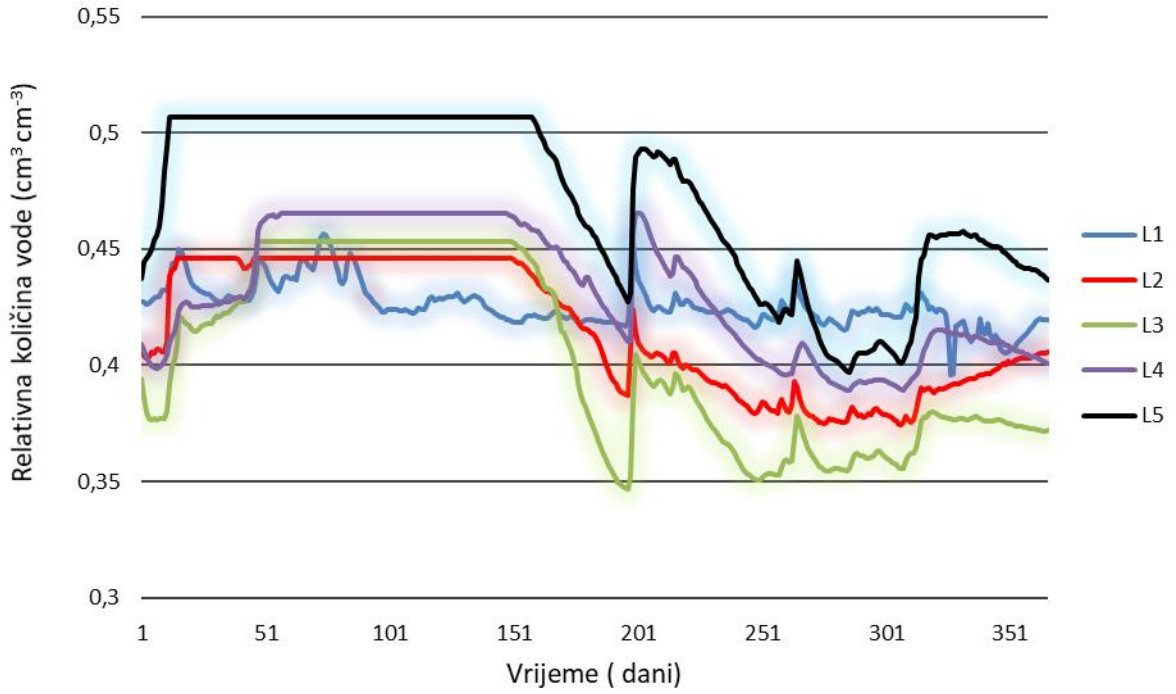
Slika 23. Prikaz relativne količine vode u tlu simuliran pomoću hydrus-1D mjeren tijekom 2016 godine, mjeren na dubini od 20 cm.



Slika 24. Prikaz relativne količine vode u tlu simuliran pomoću hydrus-1D mjeren tijekom 2016 godine, mjeren na dubini od 50 cm.



Slika 25. Prikaz relativne količine vode u tlu simuliran pomoću hydrus-1D mjeren tijekom 2016 godine, mjeren na dubini od 90 cm.



Slika 26. Prikaz relativne količine vode u tlu simuliran pomoću hydrus-1D mjeren tijekom 2016 godine, mjeren na dubini od 150 cm.

6. Zaključak

U radu je izvršeno modeliranje dinamike vodnog režima tla pomoću numeričkog modela HYDRUS-1D na osnovu provedenih istraživanja na pet lokacija na području Melioracijskog kanala Dunav-Sava tijekom 2016. godine. Simulacije u HYDRUSU-1D validirane su se na osnovu količine izmjerene procjedne vode u lizimetrima. Validacija modela (HYDRUS-1D) na lizimetrima je potvrdila dobru pouzdanost modela toka vode uz vrijednost R^2 od 0,87 – 0,96. Nakon provedene validacije modela pristupilo se modeliranju vodnog režima nesaturirane zone tla s obzirom na sezonske varijacije u razinama podzemnih voda po pojedinim lokacijama. Kalibracija hidrauličkih parametara je pokazala da se hidraulička provodljivost kretala od 9 cm dan^{-1} do 16,41 cm dan^{-1} ovisno o lokaciji. Provedenim simulacijama prikazani su rezultati vodnog potencijala te relativne količine vode po istraživanim lokacijama. Hidrauličke vrijednosti (*Ks*) bile su vrlo slične na svim lokacijama, stoga su oscilacije u vodnom potencijalu i relativnoj količini vode u prvom redu ovisile o razini podzemne vode. Na pojedinim lokacijama oscilacije su bile potpuno različite usprkos tomu što su oborine bile iste. Na dubini od 20 cm na lokaciji L3 izmjerena je najniža vrijednost vodnog potencijala na 200-i dan koji je iznosio -890 cm, dok je na isti dan na lokaciji L2 izmjerena najviša vrijednost koja je iznosila 50 cm. U navedenom razdoblju nije bilo oborina, a razina podzemne vode na obje lokacije je bila vrlo slična, na lokaciji L3 iznosila je 82 m.nm, dok je na lokaciji L2 iznosila 81 m.nm. Mjerenjem relativne količine vode u tlu na dubini od 150 cm na 200-i dan, na lokaciji L3 izmjerena je najniža vrijednost koja je iznosila 0,35 $cm^3\ cm^{-3}$, dok je na isti dan na lokaciji L5 bila prisutna potpuna saturacija tla (maksimalni kapacitet), upućujući na to da se tu nalazila podzemna voda. Uzimajući u obzir i različite tipove tala, rezultati su osim velikih varijacija u razinama podzemnih voda na svakoj lokaciji, pokazali i različite relativne količine vode i oscilacije vodnog potencijala u višim slojevima istraživanih tla. Niska količina oborina u promatranoj godini rezultirala je još većim utjecajem podzemnih voda na pokusnom području. Navedeni rezultati ukazuju na važnost resursa podzemnih voda u poljoprivrednoj proizvodnji s obzirom na njihov značajan utjecaj na površinski horizont tla, a posebno kada su potrebni sustavi navodnjavanja.

7. Literatura

1. Aller L., Bennet T.W., Hackett G., Petty R.J., Lehr J.H., Sedoris H., Nielsen D.M. (1989). Handbook of suggested Practices for the Design and Installation of Ground-Water Monitoring Wells. National Water Well Association, Dublin, Ohio, 188-189.
2. Bethune, M.G., Selle, B., Wang, Q.J. (2008). Understanding and predicting deep percolation under surface irrigation. Water Resources Research. 44: 1–16.
3. Brobst R.B., Buszka, P.M. (1986). The Effect of Three Drilling Fluids on Ground Water Sample Chemistry. Groundwater Monitoring & Remediation, 6(1): 62–70.
4. Carsel, R. F., Parrish, R. S. (1988). Developing joint probability distibutions of soil water retention characteristics. Water Resources Research, 24: 755-769.
5. Coquet, Y., Šimůnek, J., Coutadeur, C., van Genuchten, M.Th., Pot, V., Roger-Estrade, J. (2005). Water and solute transport in a cultivated silt loam soil: 2. Numerical analysis. Vadose Zone Journal, 4: 587–601.
6. Dolanjski D., Petošić D., Stričević I. (1999). Dinamika podzemnih voda na dijelu Srednje Posavine. Poljoprivredna znanstvena smotra, 64(1): 49-58.
7. Filipović V. (2015). Modeliranje pronosa tvari u nesaturiranoj zoni tla. U Voda u agroekosustavima (Ondrašek G. Ur.) Agronomski fakultet, Zagreb 281-292.
8. Filipović V., Kodešová R., Petošić D. (2012). Experimental and mathematical modeling of water regime and nitrate dynamics on zero tension plate lysimeters in soil influenced by high groundwater table. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 95(1): 23–42.
9. Gjetvaj G. (2006). Skripte iz hidraulike. Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
10. Gogolev M. (2002). Assessing groundwater recharge with two unsaturated zone modeling technologies.Environmental Geology 42: 248–258.
11. Herzog B., Pennino J., and Nielsen, G. (1991). Groundwater sampling. In Nielsen, DM. Practical handbook of groundwater minitoring, Lewis publishers (an imprint of CRC Press), Chelsea, MI.
12. IGRAC - International Groundwater Resources Assessment Centre, <www.un-igrac.org>. Pristupljeno 12. travnja 2018.
13. Jiménez-Martínez J., Skaggs T.H., van Genuchten M.T., Candela L. (2009) A root zone modelling approach to estimating groundwater recharge from irrigated areas. Journal Hydrology. 367: 138–149.
14. Kumar C.P. (2001). Common Ground Water Modeling Errors and Remediation. Journal of Indian Water Resources Society. 21(4): 149-156.
15. Leij F. J., Alves W. J., van Genauchten M. Th. (1990). User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport and inverse geochemical calculations. Water Resources Investigations, Report. USGS, Denver, CO.
16. Lu X.H., Jin M.G., van Genuchten, M.T., Wang B.G. (2011). Groundwater recharge at five representative sites in the Hebei Plain, China. Ground Water. 49: 286–294.

17. Marijanović Rajčić M., Širac S., (2008). Sadašnji i budući monitoring podzemnih voda, Hrvatske vode, god. 16., broj 63: str 99-103.
18. Mattern S.; Vanclooster M. (2010). Estimating travel time of recharge water through a deep vadose zone using a transfer function model. Environmental Fluid Mechanics 10: 121–135.
19. Mualem Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research, 12(3): 513-522
20. Mustać I. (2015). Modeliranje toka podzemne vode. U Voda u agroekosustavima (Ondrašek G. Ur.) Agronomski fakultet, Zagreb 256-258.
21. Mustać I., Petošić D., Filipović V., Tomić F., Ondrašek G., Knežević D., Igrc M.D., Kranjčec F., Maurović N. (2017). Monitoring vodnog režima poljoprivrednih tala i kakvoće vode na području dovodnog melioracijskog kanala za navodnjavanje Bið-Bosutskog polja za 2016. godinu, Agronomski fakultet, Zagreb.
22. Nielsen D.M., Schalla, R (1991). Design and instalation of Ground-water Monitoring Wells in Practical Handbook of Ground-Water Monitoring, David M., Nielsen (ed.) , Lewis Publishers, Chelsea Michigan: 239-331
23. Petošić D., Mustać I. (2010). Značajke vodnog režima i kakvoće vode poljoprivrednih tala na području višenamjenskog kanala Dunav-Sava. Agronomski fakultet, Zagreb.
24. Petošić D., Tomić F., Stričević I., Dolanjski, Mustać I. (2002). Vodni režim i stanje tla na području donjeg toka kanala Dunav – Sava, s monitoringom, studija. Agronomski fakultet, Zagreb.
25. Pušić B., Škorić A. (1965). Prilog poznavanja hidrologije, klasifikacije i odvodnje tala doline Save, Zemljište i biljka, 14(3): 271-288, Zagreb.
26. Schaap M. G., Leij F. J., van Genuchten M. Th. (2001). ROSETTA: a computer model for estimating Soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. Journal of Hydrology 251: 163-176.
27. Scott R.L., Shuttleworth W.J., Keefer T.O., Warrick A.W. (2000). Modeling multiyear observations of soil moisture recharge in the semiarid American Southwest. Water Research. 36: 2233–2247.
28. Sosebee J.B., P.C. Geiszler D.L. Winegardner and C.R Fisher (1983). Contamination of ground-water samples with PVC adhesives and PVC primer from monitor wells; Proceedings of the ASTM Second Symposium on Hazardous and Industrial Solid Waste Testing, ASTMSTP 805, R.A. Conway and W.P. Gulledge, eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pennsylvania: 38-50.
29. Stuart Well Services Ltd – Piezometar, <https://www.stuartwells.co.uk>. Pristupljeno 20. svibnja 2018.
30. Šimůnek J., Šejna M., van Genuchten M. Th. (1999). The HYDRUS software package for simulating twodimensonal movement of water, heat, and multiple solutes in variable saturated media. Version 2.0, IGWMC-TPS-53. International Ground Water Modeling Centar, Colorado School of Mines, Golden, Colorado.

31. Šurmanović D., Artuković M., Jokić M., (2003). Uloga monitoringa kakvoće voda u vodno gospodarskom planiranju. 3 Hrvatska konferencija o vodama, Osijek, 28.-31. svibnja 2003. str 673-682.
32. Toride N., Leij F. J., van Genuchten M. Th. (1995). The CXTFIT Code for Estimating Transport Parameters from Laboratory or Field Tracer Experiments, Research Report No. 137. California.
33. Van Genuchten M. Th. (1980). A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal. 44: 892 – 1037.
34. Van Genuchten M. Th., Leij F. J., Yates S. R. (1991). The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, Version 1.0. EPA Report 600/2-91/065, U.S. Salinity Laboratory, USDA, Riverside, California.
35. Van Genuchten M. Th., Leij F. J., Yates S. R. (1991). The RETC Code for Quantyfing the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, Version 1.0. EPA Report 600/2-91/065, U. S. Salinity Laboratory, USDA, Riverside, California.
36. Whermann H., Allen 1983. Monitoring well design and for ground-water monitoring at solid waste disposal facilities construction; Ground Water Age, vol. 17(8): 35-38.
37. Wu Q., Wang G., Zhang W., Cui H., Zhang W. (2016). Estimation of Groundwater Recharge Using Tracers and Numerical Modeling in the North China Plain.

8. Životopis

Rođena 12.05.1994. u Novoj Gradiški, prebivalište Cernik. Pohađala Opću gimnaziju u periodu od 2009.-2013. godine u Novoj Gradiški. Kroz srednjoškolsko obrazovanje stečen stupanj B2 razine engleskog jezika. Upisan Agronomski fakultet u Zagrebu, smjer Poljoprivredna tehnika 2013. godine, završen 2016. Upisan diplomski studij, smjer Melioracije 2016. godine, završen 2018. godine. Vješto znanje rada na računalu i korištenje potrebnih programa.