

UTJECAJ POLJOPRIVREDE NA KAKVOĆU PODZEMNIH VODA NA PODRUČJU PREKOGRANIČNOG REZERVATA BIOSFERE MURA-DRAVA-DUNAV

**izv. prof. dr. sc. Tamara Brleković,
mag. ing. aedif.**

Sveučilište J. J. Strossmayera
u Osijeku
Građevinski i arhitektonski
fakultet Osijek
Ulica Vladimira Preloga 3,
Osijek, Hrvatska
tamaradadic@gfos.hr

Josip Janjić, mag. ing. aedif.

Sveučilište J. J. Strossmayera
u Osijeku
Građevinski i
arhitektonski fakultet Osijek
Ulica Vladimira Preloga 3,
Osijek, Hrvatska

**prof. dr. sc. Lidija Tadić,
dipl. ing. građ.**

Sveučilište J. J. Strossmayera
u Osijeku
Građevinski i arhitektonski
fakultet Osijek
Ulica Vladimira Preloga 3,
Osijek, Hrvatska

prof. dr. Enikő Anna Tamás

University of Public Service
Faculty of Water Sciences
Bajcsy-Zsilinszky u. 12 – 14, 6500
Baja, Hungary

Poljoprivreda je izražena djelatnost u slivnom području Karašica-Vučica, dijelu Prekograničnog rezervata biosfere Mura-Drava-Dunav (TBR MDD). Model pronosa nitrata, česte vrste onečišćenja podzemnih voda uzrokovanog poljoprivredom, razvijen je za procjenu koncentracije nitrata u podzemnim vodama unutar ovog područja. Modelirane su hipotetske vrijednosti unosa onečišćenja nitratima u podzemne vode u najsušnijoj i najvlažnijoj godini koje su se pojavile u razdoblju od 2000. do 2020. godine. Unatoč visokim ulaznim vrijednostima, dvostruko većim od dozvoljenih, rezultati su pokazali niske koncentracije nitrata (< 50 mg/L) na analiziranom dijelu sliva koji se nalazi između rijeka Karašice i Drave. Sjeverni dio slivnog područja koji graniči s Prekograničnim rezervatom biosfere Mura-Drava-Dunav pokazao je najniže koncentracije nitrata. S obzirom na bioraznolikost i prirodne krajolike Prekograničnog rezervata biosfere Mura-Drava-Dunav, posebnu pozornost treba posvetiti potencijalnim onečišćenjima, posebice nitratima zbog njihovog štetnog djelovanja. Iako rezultati predstavljaju optimističnu perspektivu, stalna istraživanja i monitoring su ključni za očuvanje cjelovitosti ovog ekološki značajnog područja.

Ključne riječi: Sliv Karašica-Vučica, prekogranični Rezervat biosfere Mura-Drava-Dunav (TBR MDD), podzemna voda, nitrati

1. UVOD

Prekogranični rezervat biosfere Mura-Drava-Dunav je zeleni pojas dugačak gotovo sedamsto kilometara koji se proteže kroz Austriju, Sloveniju, Mađarsku, Hrvatsku i Srbiju. U rujnu 2021. UNESCO je ovaj jedinstveni krajolik proglasio prvim svjetskim rezervatom biosfere koji se prostire na teritoriju 5 zemalja. Gotovo milijun hektara jedinstvenih prirodnih krajolika čini najveće europsko zaštićeno područje koje karakterizira bogata biološka raznolikost i značajno je po broju rijetkih prirodnih vrsta i staništa (Csagoly i sur. 2016). Koherentna mreža

od dvanaest glavnih zaštićenih područja duž rijeka, Mure, Drave i Dunava ističe njihove ekološke vrijednosti i osjetljivost na ljudske i prirodne utjecaje (Tadić i sur. 2022).

Unatoč očuvanim prirodnim obilježjima, rijeke Mura, Drava i Dunav pretrpjele su ljudske intervencije u posljednja dva stoljeća. Većina njih je povezana s riječnim regulacijama, ali jednaku važnost imaju i promjena korištenja namjene zemljišta zajedno s poljoprivrednim utjecajima u širem okolnom području. Prostorno-vremenske varijacije protoka u vodotocima i

razine podzemne vode izravno i neizravno kontroliraju strukturu i dinamiku biotskih zajednica. Također, utječu na složene procese unutar ekosustava, kao što su unos i transformacija hranjivih tvari, obrada organskih tvari i metabolizam ekosustava (Palmer i sur. 2019).

Prekogračni rezervat biosfere Mura-Drava-Dunav prolazi kroz Hrvatsku uključujući sjeverni dio slivnog područja Karašica-Vučica (slika 1). Budući da su poljoprivredne aktivnosti široko rasprostranjene u tom području, u ovom radu će se analizirati mogući poljoprivredni utjecaji na dio Prekogračnog rezervata biosfere Mura-Drava-Dunav kroz koncentraciju nitrata u podzemnim vodama na području gdje se slivno područje Karašica-Vučica i Prekogračni rezervat biosfere Mura-Drava-Dunav preklapaju (slika 1). Visoka koncentracija nitrata najčešće je antropogeno onečišćenje podzemnih voda, osobito zbog poljoprivrednih aktivnosti, a prisutnost koncentracija nitrata obično se koristi kao pokazatelj kvalitete (Matiatos 2016; Rahman i sur. 2021). Veće koncentracije nitrata u podzemnim vodama mogu uzrokovati probleme zbog negativnog utjecaja na zdravlje ljudi i okoliš. Zbog malih brzina podzemnih voda i svoje kemijske stabilnosti, nitrati predstavljaju dugotrajno onečišćenje podzemne vode (Rodriguez-Galiano i sur. 2014). Na analiziranom području nalazi se samo jedan piezometar za opažanja kakvoće podzemnih voda za razdoblje od 2000. do 2020. godine i na temelju preliminarnih rezultata iz promatranog piezometara označenog na slici 1 očekuje se da će kemijsko stanje podzemnih voda biti dobro. Međutim nitrati, kao najčešće onečišćujuće tvari koje uzrokuju nepostizanje dobrog kemijskog stanja podzemnih voda, moraju se dalje pratiti i potrebna je detaljnija analiza. Jedno opažajčko mjesto je u svakom slučaju nedostavno i nepouzdanost za donošenje zaključaka primjenjivih za cijelo analizirano područje. Zbog toga je model proveden za dvostruko veću koncentraciju nitrata od one koja je dopuštena prema Pravilniku o parametrima sukladnosti, metodama analiza i monitorinzima vode namijenjene za ljudsku potrošnju (NN 64/2023). Cilj rada je prikazati potencijalnu ugroženost vrijednog rezervata biosfere Mura-Drava-Dunav nitratima dospjelim u podzemne vode sa susjednih poljoprivrednih područja.

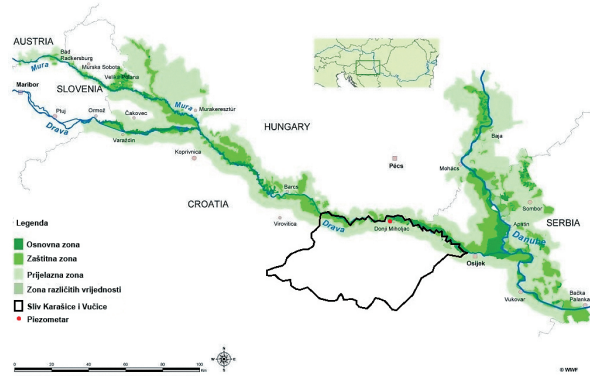
2. METODE

2.1. Područje istraživanja

Slivno područje rijeka Karašice i Vučice nalazi se u slivu rijeke Dunav, dijelu sliva rijeke Drave u nizinskom dijelu istočne Hrvatske u dijelovima Osječko-baranjske i Virovitičko-podravne županije (slika 1). Vegetacijski pokrov najvećim dijelom čine poljoprivredne površine, pašnjaci i šume. Njegovim sjevernim dijelom prolazi Prekogračni rezervat biosfere Mura-Drava-Dunav.

Analizirano područje, a to je dio sliva koji se nalazi između rijeke Drave na sjeveru i rijeke Karašice na jugu (slika 2) i pripada području Prekogračnog rezervata biosfere, ima površinu od 308,32 km².

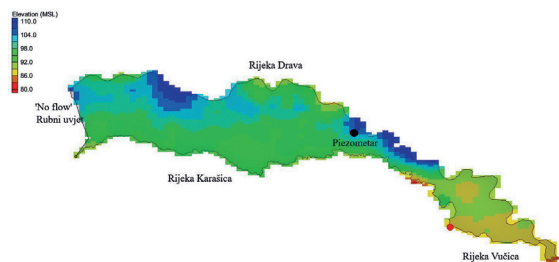
5-country Biosphere Reserve Mura-Drava-Danube (TBR MDD)



Slika 1: Područje Prekogračnog rezervata biosfere Mura-Drava-Dunav s označenim slivom Karašice i Vučice (izmijenjeno prema Tadić i sur. 2022)



Slika 2: Analizirani dio slivnog područja Karašice i Vučice s naznačenim ušćem Karašice u Vučicu



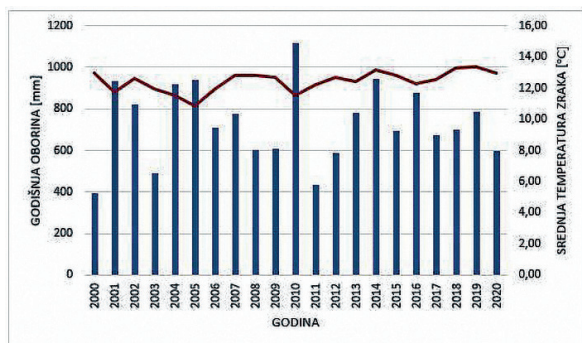
Slika 3: Nadmorske visine područja istraživanja u slivu Karašica-Vučica

Prema topografskim karakteristikama, ovo je pretežito nizinsko područje s nadmorskom visinom između 85 i 105 metara (slika 3). Najveće nadmorske visine su u zapadnom dijelu (105 m n.m.), dok je najniža nadmorska visina na ušću Vučice u Dravu (85 m n.m.)

2.2. Klimatski uvjeti

Klima je na ovom području kontinentalna s hladnim zimama i toplim ljetima. Prosječna godišnja temperatura zraka za razdoblje od 2000. do 2020. godine iznosi 12,44 °C, a srednja godišnja količina oborine za isto razdoblje iznosi 732 mm (slika 4). Svi podaci se odnose na meteorološku postaju Donji Miholjac.

Uz oborine i temperaturu evapotranspiracija je također vrlo važan parametar vodne bilance jer se odnosi na količinu vode koja ispari sa sliva i predstavlja ukupnu evapotranspiraciju iz tla i biljaka. Referentna evapotranspiracija izračunata je prema metodi Blaney-Cridde, iz podataka zabilježnih na meteorološkoj postaji Donji Miholjac prema izrazu preuzetom iz literature FAO



Slika 4: Godišnja količina oborine i srednja godišnja temperatura zraka za razdoblje od 2000. do 2020. godine promatrana na meteorološkoj postaji Donji Miholjac

(2016) i Trajković (2009).

2.3. Model toka podzemne vode

Model pronosa nitrata zahtijeva poznavanje razine podzemne vode i brzine toka podzemne vode. Prvi korak bio je razvoj modela koji obuhvaća samo strujanje podzemne vode. U tu svrhu korišten je računalni program za trodimenzionalno numeričko modeliranje podzemnih voda (MODFLOW unutar GMS 10.5). Ovaj program je temeljen na metodi konačnih razlika. Na razini konceptualnog modela definirane su lokacije izvora i ponora (npr. svi veći vodotoci, kanali, vodoopskrbni zdenci) sa svim potrebnim ulaznim podacima (kote dna, vodostaji, provodljivost dna vodotoka). Vrijednosti infiltracije (dio oborina koji prihranjuje podzemne vode) i evapotranspiracije definirane su samo za 2013. godinu jer ta godina odgovara prosječnoj klimatskoj godini u odnosu na razdoblje od 2000. do 2020. godine. Stopa infiltracije definirana je kao 20 % srednje godišnje količine oborine zabilježene na meteorološkoj postaji Donji Miholjac (Dadić 2016). Evapotranspiracija predstavlja gubitak vode i definirana je s obzirom na razdoblje rasta (0,0027 m/d). Potrebna su još dva parametra kako bi se evapotranspiracija unijela u model: ravnina evapotranspiracije i dubina slabljenja. Ova dva parametra su definirana na temelju geometrije modela, vrste tla i vegetacijskog pokrova (Shah i sur. 2007). Vegetacijski pokrov relevantan za definiranje dubine slabljenja, utvrđen je temeljem Corine Land Cover (CLC) za 2012. godinu. Corine Land Cover je digitalna baza podataka o promjenama pokrova i korištenja zemljišta za Republiku Hrvatsku od 1990. do 2018. godine. Ova baza je konzistentna i homogenizirana s podacima o



Slika 5: Poligoni korišteni za definiranje referentne evapotranspiracije u modelu

zemljišnom pokrovu za cijelu Europsku uniju (Agencija za zaštitu okoliša). Poligoni koji su korišteni u modelu i dobiveni na temelju različitih dubina slabljenja prikazani su na slici 5.

S obzirom na to da svi parametri ovise o vremenu, definirani su za isti mjesec kako bi se dobila što bolja točnost modela. Stoga su vrijednosti oborina, infiltracije, referentne evapotranspiracije (ET₀), vodostaja za rijeku Dravu i rijeku Karašicu definirane za isti mjesec, a to je kolovoz 2013. Taj mjesec je odabran zbog dostupnosti podataka i činjenice da odabrani mjesec ima meteorološka obilježja najbliža prosječnoj klimatskoj godini. Nakon kalibracije kreiran je model stacionarnog stanja za svaku godinu u promatranom razdoblju kako bi se vidjela sposobnost modela da simulira srednje godišnje razine podzemne vode. Posebna pozornost posvećena je najsušnijim i najvlažnijim godinama.

Značajan dio konceptualnog modela činili su slojevi tla. Samo je jedan sloj (gornji vodonosnik) definiran u slivnom području zbog promatranja transporta nitrata uslijed poljoprivrednih aktivnosti. Sloj se sastojao od naslaga mulja i gline niske propusnosti, pomiješanih s pijeskom. Prema ovom opisu tla i literaturi (Bačani 2006; Domenico i Schwartz 1998) vrijednost hidrauličke vodljivosti za sloj iznosi 1,728 m/d. Konačna vrijednost hidrauličke vodljivosti dobiva se u procesu kalibracije. Vertikalna anizotropija je 10 (Gjetvaj i sur. 2011). Rubni uvjeti na sjevernom i južnom dijelu su rijeke, a na zapadnom dijelu rubni uvjet je da nema protoka, odnosno *no flow*, rubni uvjet koji se najčešće uzima ako nema rijeke na granici modela (prikazano na slici 3).

Za simulaciju je odabran paket Newton Solver zbog složenosti i veličine promatranog područja kako bi model lakše konvergirao. Ova metoda je namijenjena rješavanju problema koji uključuju nelinearnosti isušivanja i ponovnog vlaženja jednadžbe protoka podzemne vode. MODFLOW-NWT se mora koristiti s paketom Upstream-Weighting (UPW) za izračun međučelijske vodljivosti (Niswonger 2011).

2.4. Model pronosa nitrata

Pronos nitrata u podzemnim vodama je složen i teško predvidljiv proces zbog utjecaja mnogih različitih čimbenika. Zbog toga se za definiranje tog procesa koriste numerički modeli. Najčešći je MT3DMS koji je kompatibilan s MODFLOW programom i predstavlja njegovu nadogradnju. MT3DMS se također nalazi unutar GMS 10.5 paketa. Osim razina i brzina podzemne vode dobivenih iz kalibriranog modela toka podzemne vode, bilo je potrebno nekoliko drugih parametara za definiranje i opis procesa advekcije i disperzije kojima se opisuje kretanje onečišćenja. Vrijednosti ovih parametara navedene su u tablici 1 kao i njihovi izvori.

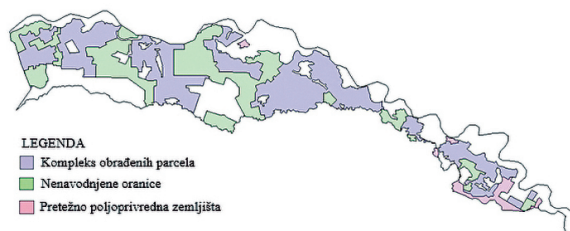
MT3DMS sadrži više tehnika transportnih rješenja i u ovom slučaju korištena je shema smanjenja ukupne varijacije trećeg reda (*the third-order total variation diminishing – TVD*). Ova metoda predstavlja kombinaciju metode sheme karakteristika i metode

Tablica 1: Parametri potrebni za model MT3DMS s navedenim izvorima

Parametar	Vrijednost	Referenca
Volumna gustoća [kg/m ³]	1600	Hantush i Wang, 2003
Poroznost [-]	0,30	Domenico i Schwartz, 1998
Uzdužna disperzivnost [m]	10	Jiang i Somers, 2009; Takounjou i sur., 2013; Zheng i sur., 2012
Omjer horizontalne transverzalne disperzivnosti i longitudinalne disperzivnosti [-]	0,1	Almasri, 2007; Jiang i Somers, 2009; Takounjou i sur., 2013, Tziatzios i sur., 2015
Omjer vertikalne transverzalne disperzivnosti i longitudinalne disperzivnosti [-]	0,01	Jiang i Somers, 2009; Takounjou i sur., 2013

konačnih razlika (Zheng i sur. 2012). Disperzija je definirana pomoću parametra longitudinalne disperzivnosti, omjera horizontalne transverzalne disperzivnosti prema longitudinalnoj disperzivnosti i omjera vertikalne transverzalne disperzivnosti prema longitudinalnoj disperzivnosti. Trebalo je definirati i izvore potencijalnog onečišćenja. U ovom slučaju izvor su bile poljoprivredne površine prikazane slikom 5 koje su usvojene koristeći Corine Land Cover (CLC) za 2012. godinu. Prema ovoj bazi podataka najzastupljeniji su različiti tipovi poljoprivrednih površina (slika 6). Neprikazani dijelovi područja su šume, voćnjaci, vodene površine i antropogene površine. Kako se nije raspolagalo detaljnijim podacima, a radi strane sigurnosti, pretpostavljeno je da su sve poljoprivredne površine izvor onečišćenja nitratima. Poljoprivredne površine su grupirane prema klasifikaciji Corine i kao takve predstavljaju raspršene izvore onečišćenja. Kako bi se znalo koje bi klase korištenja zemljišta rezultirale višim koncentracijama nitrata, istraživanje bi trebalo provesti u manjem mjerilu. Analiza u ovom radu temeljila se na cijelom podslivu rijeke Karašice pa su klase korištenja zemljišta grupirane u tri klase s istom ulaznom koncentracijom nitrata. Prema različitim autorima postoje široki rasponi koncentracija nitrata koje se ispiru u tlo. Te koncentracije nitrata koje ulaze u tlo ispiranjem s poljoprivrednih površina izmjerene na terenu prema različitoj literaturi su u rasponu 3 – 11,9 mg/L N (dušik u obliku nitrata), što je 13,28 – 52,25 mg/L nitrata (Jiang i sur. 2015). Prem istom izvoru ispiranje s travnjaka i pašnjaka utvrđeno je u koncentracijama od 4,42 do 11,8 mg/L, a iz šumskih površina 1,32 mg/L. U nekim istraživanjima analizirano je nekoliko različitih scenarija na temelju koncentracija ispiranja nitrata (Molénat i Gascuel-Odoux 2002), koje su varirale od 50 do 150 mg/L. Jiang i Somers (2009) analizirali su ispiranje prema različitim usjevima. Zaključili su da koncentracije nitrata variraju čak i kada se promatra samo jedna vrsta usjeva (44,27 – 119,53 za krumpir, 13,28 – 44,27 za ječam i 39,84 – 44,227 za djetelinu). Prema Jiang i Somersu (2009) koncentracije ispiranja nitrata ovise o korištenju zemljišta, tipu tla i lokalnoj klimi pa su zbog toga izražene vremenske i prostorne varijacije. Zbog nedostatka mjerenja odabrana je koncentracija nitrata od 100 mg/L koja je upuštena kao ulazna koncentracija sa svih poljoprivrednih površina. Granična vrijednost

koncentracija nitrata je 50 mg/L što je najveća dopuštena koncentracija prema Pravilniku o parametrima sukladnosti, metodama analiza i monitorinzima vode namijenjene za ljudsku potrošnju (NN 64/2023), ali i granična vrijednost prema Direktivi Vijeća (91/676/EEZ) od 12. prosinca 1991. o zaštiti voda od onečišćenja uzrokovano nitratima iz poljoprivrednih izvora pa je ovdje odabrana dvostruka vrijednost. Ovo je hipotetska vrijednost i poslužit će za usporedbu između modela pronosa nitrata za najsušniju i najvlažniju godinu u razdoblju od 2000. do 2020. godine.



Slika 6: Različiti načini korištenja poljoprivrednog zemljišta

Budući da oborine imaju najveći utjecaj na pronos nitrata u podzemnim vodama (Filipović 2012; Hooda i sur. 2000), konstruirana su dva modela pronosa nitrata, za najsušniju godinu u analiziranom razdoblju i najvlažniju godinu. Najsušnija godina je 2000. s količinom oborine od 393,9 mm, a najvlažnija 2010. godina s količinom oborine od 1117,6 mm.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

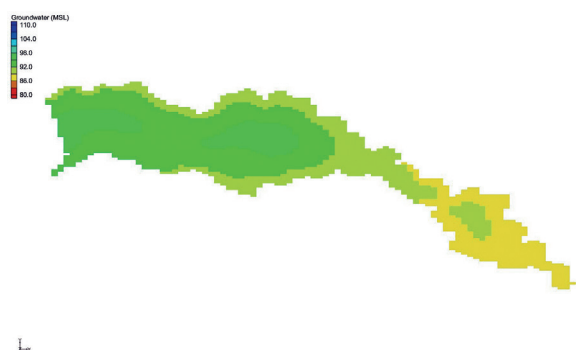
Rezultati stacionarnog modela za 2013. godinu nakon kalibracije prikazani su na slici 7. Prema Državnom hidrometeorološkom zavodu gdje se u hidrološkim mrežama nalaze postaje podzemnih voda, na analiziranom području nalazi se samo jedan piezometar, stoga su podaci opažani na tom piezometru korišteni za kalibraciju, a njegova lokacija prikazana je na slici 1. Dobiveno je dobro podudaranje, unutar prihvatljive točnosti između izračunatog rješenja i razine podzemne vode opažene na terenu (razlika 0,05 m). Postupak kalibracije proveden je promjenom ulaznog parametra s najvećim stupnjem nesigurnosti. U modelima strujanja koji analiziraju podzemne vode, taj ulazni parametar je obično hidraulička vodljivost

koji se često naziva i koeficijent filtracije. Dakle, vrijednost hidrauličke vodljivosti mijenjala se sve dok nije postignuta prihvatljiva razina točnosti. Konačna vrijednost bila je 10,2 m/d. Postupak kalibracije bio bi pouzdaniji kada bi u ovom području bilo više piezometara kako bi se smanjila nesigurnost modela jer može postojati više kombinacija vrijednosti parametra koje mogu dovesti do istog rješenja. Slika 7 prikazuje rezultate nivoa podzemnih voda dobivenih nakon kalibracije za prosječnu klimatološku godinu (2013.).

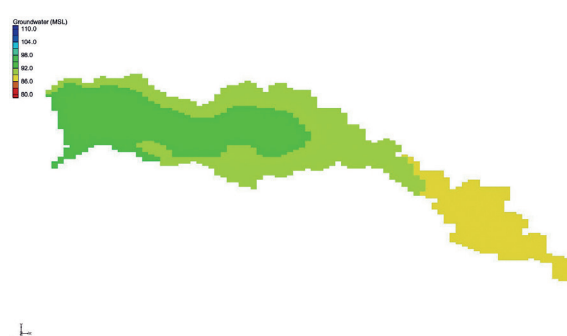
Viša razina podzemne vode je u središnjem dijelu analiziranog područja, a niža u blizini Drave i Karašice te u jugoistočnom dijelu. Također su dobiveni modeli

stacionarnog stanja za srednje godišnje vrijednosti za svaku godinu u promatranom razdoblju. Rezultati, kao i ulazni parametri, prikazani su u tablici 2.

Rezultati općenito pokazuju niže razine nego što je primjećeno na terenu, a to znači da model u određenoj mjeri podcjenjuje stanje na terenu što svakako treba uzeti s rezervom s obzirom na to da je na analiziranom području bio dostupan samo jedan piezometar za kalibraciju. Najbolje podudaranje je za 2001. godinu s razlikom od 0,02 m, a najveća razlika je za 2006. godinu s iznosom od 1,23 m. Obje vrijednosti su niže od izmjerenih. S obzirom na to da su svi ulazni parametri bili prosječne godišnje vrijednosti, dobivena poklapanja



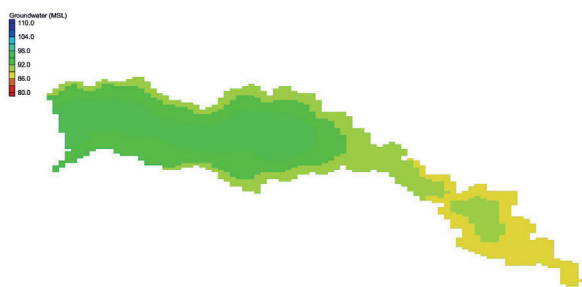
Slika 7: Modelirane razine podzemne vode za 2013. godinu nakon kalibracije



Slika 8: Modelirana razina podzemne vode za 2000. godinu

Tablica 2: Parametri za model stacionarnog stanja

Godina	ET ₀ (m/d)	Stopa infiltracije (m/d)	Izmjerena razina podzemne vode (m n.m.)	Modelirane razine podzemne vode (m n.m.)	Razlika (m)
2000.	0,0036	0,0002	91,04	90,52	0,52
2001.	0,0035	0,0005	90,26	90,28	-0,02
2002.	0,0036	0,0004	90,54	90,23	0,31
2003.	0,0036	0,0003	90,39	90,08	0,31
2004.	0,0035	0,0005	90,50	90,08	0,42
2005.	0,0033	0,0005	91,73	90,79	0,93
2006.	0,0036	0,0004	91,91	90,68	1,23
2007.	0,0037	0,0004	90,55	90,22	0,33
2008.	0,0036	0,0003	90,31	90,13	0,18
2009.	0,0037	0,0003	90,07	90,13	-0,06
2010.	0,0036	0,0006	91,53	90,87	0,66
2011.	0,0037	0,0002	91,47	90,54	0,93
2012.	0,0037	0,0003	90,05	90,12	-0,08
2013.	0,0034	0,0004	91,14	90,71	0,42
2014.	0,0038	0,0005	91,31	90,29	1,02
2015.	0,0038	0,0004	91,85	90,67	1,18
2016.	0,0036	0,0005	91,27	90,67	0,59
2017.	0,0037	0,0004	91,24	90,66	0,58
2018.	0,0038	0,0004	91,36	90,67	0,69
2019.	0,0038	0,0004	90,27	90,22	0,05
2020.	0,0037	0,0003	89,98	90,13	-0,15

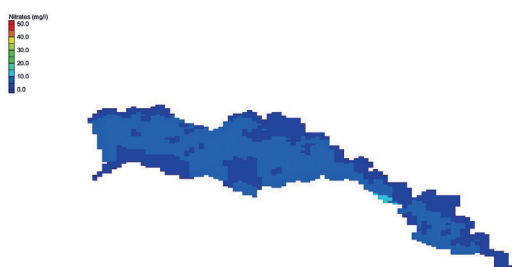


Slika 9: Modelirana razina podzemne vode za 2010. godinu

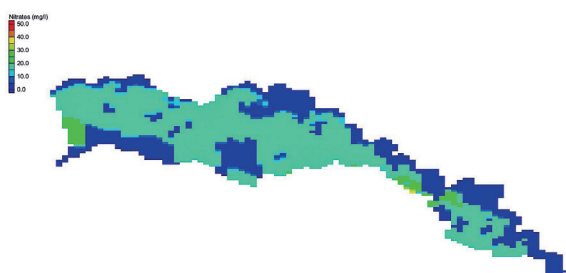
su na zadovoljavajućoj razini te je zaključak da model može simulirati srednje godišnje razine podzemne vode.

Rezultati modela (razine podzemnih voda) prikazani su (slike 8 i 9) samo za dvije godine: godinu s najmanje oborine u analiziranom razdoblju (2000. godina s oborinom od 393,9 mm) i godina s najviše oborina (2010. godina s oborinom od 1117,6 mm).

Očekivano, manje oborina (i niža stopa infiltracije) rezultiralo je nižim razinama podzemnih voda, osobito u jugoistočnom dijelu (slika 8). Rezultat stacionarnog modela za godinu s najvećom oborinom pokazao je porast razine podzemnih voda koji je najočitiji u jugoistočnom dijelu (slika 9).



Slika 10: Koncentracija nitrata za 2000. godinu



Slika 11: Koncentracija nitrata za 2010. godinu

Rezultati modela pronosa nitrata također su prikazani za najsušniju godinu (2000.) i najvlažniju godinu (2010.). Vrijeme simulacije za oba modela bila je jedna godina, a slike 10 i 11 prikazuju koncentraciju nitrata na kraju vremena simulacije.

Uz vrstu i količinu korištenog gnojiva najveći utjecaj

na promjenu koncentracije nitrata u podzemnim vodama imaju oborine. Provedena su brojna istraživanja o utjecaju oborina na nitrata (Filipović 2012; Hooda i sur. 2000). S povećanjem količine oborina raste i koncentracija nitrata u podzemnim vodama. Međutim, taj se odnos mijenja kada se pojave ekstremne oborine, zbog čega se koncentracija nitrata smanjuje. To se događa zbog naglog porasta razine podzemne vode, što uzrokuje razrjeđenje. Navodnjavanje ima sličan učinak na promjene koncentracije nitrata. Ovaj se odnos može pratiti samo na kontrolnim poljima jer je teško pratiti količinu vode dodane za potrebu navodnjavanja, kao i točno vrijeme kada se ta voda dodaje u većim područjima kao što je županija ili veće slivno područje.

U ovom radu dobivene su veće koncentracije nitrata za model s višom stopom infiltracije (2010. godina s velikim oborinama). Dakle, povećane oborine uzrokovale su veću koncentraciju nitrata, ali istovremeno oborine (stopa infiltracije) nisu bile tolikog intenziteta da bi uzrokovale razrjeđenje.

Iako je stopa unosa nitrata bila 100 mg/L, rezultati pokazuju puno nižu koncentraciju u podzemnim vodama za cijelo područje. Za prvi model (2000. godina) koncentracije su čak niže od koncentracije dobivene za 2010. godinu. Maksimalne koncentracije su ispod 30 mg/L što je ispod maksimalno dopuštene koncentracije (50 mg/L). Model za 2010. godinu rezultirao je višim koncentracijama koje su još uvijek niže od 50 mg/L. Prema Ocjeni stanja i ugroženosti podzemnih voda u panonskom dijelu iz 2009. godine (Hrvatski geološki institut 2009) i Izvješću o stanju podzemnih voda u 2019. godini (Hrvatske vode 2020) dobivene koncentracije iz modela uglavnom se podudaraju s nalazima iz ovih izvješća. Prema tim izvješćima koncentracije nitrata u području istočne Slavonije (sliv Drave i Dunava) su niske sa srednjom vrijednosti od 2,8 mg/l. Mnoga su istraživanja pokazala niže koncentracije nitrata na ovom području (ili okolici) tijekom nekoliko godina mjerenja nego, primjerice, u podzemnim vodama u sjevernom dijelu Hrvatske oko Varaždina i Zagreba zbog različitih granulometrijskih frakcija tla, poroznosti i, što je najvažnije, debljine naslaga gornjeg vodonosnika (Šrajbek i sur. 2022). Ovaj gornji sloj, krovina vodonosnika, ima važnu funkciju zadržavanja onečišćenja koje dolazi s površine tla, pa veća debljina tog krovinskog sloja u istočnom dijelu Hrvatske pozitivno utječe na kvalitetu podzemnih voda.

U oba modela maksimalne koncentracije nitrata pojavile su se na istom dijelu analiziranog područja, u blizini rijeke Karašice u iznosima između 20 i 30 mg/L. Područje u sjevernom dijelu, uz rijeku Dravu, rezultiralo je vrlo niskim koncentracijama (< 10 mg/L). U ovom dijelu sliva nalazi se Prekogranični rezervat biosfere Mura-Drava-Dunav, pa niske koncentracije nitrata u podzemnim vodama pokazuju da poljoprivredni utjecaj na kvalitetu podzemnih voda nije prijeteći.

4. ZAKLJUČAK

Poljoprivredne aktivnosti su široko rasprostranjene u slivnom području Karašica-Vučica, a njegovim sjevernim dijelom prolazi Prekogranični rezervat biosfere Mura-Drava-Dunav. Zbog toga je razvijen model pronosa nitrata za analizu koncentracija nitrata u podzemnim vodama na području gdje se preklapaju Prekogranični rezervat biosfere Mura-Drava-Dunav i slivno područje rijeka Karašice i Vučice. Dobiveni rezultati pokazali su niske koncentracije iako su ulazne vrijednosti bile visoke i hipotetske (100 mg/L). Najniže koncentracije bile su u sjevernom dijelu

gdje prolazi Prekogranični rezervat biosfere Mura-Drava-Dunav što je vrlo važan zaključak s obzirom na njegovu bogatu bioraznolikost i izuzetno vrijedne krajobrazne vrijednosti. Svako moguće onečišćenje, pa tako i onečišćenje nitratima, može imati izrazito negativni učinak na vrijednosti ovog prekograničnog rezervata. Rezultati dobiveni u ovom radu vrlo su ohrabrujući, no treba uzeti u obzir činjenicu da se radilo o hipotetskom modelu. Zbog toga, ali i zbog važnosti istraživanog područja, potrebna su daljnja detaljnija istraživanja i kontinuirano dugotrajno praćenje. ■

LITERATURA

Almasri, M. N. 2007. Nitrate contamination of groundwater: A conceptual management framework. *Environmental Impact Assessment Review*. 27: 220–242.

Bačani, A. 2006. *Hidrogeologija I*. Rudarsko-naftno-geološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Zagreb.

Csagoly, P.; Magnin, G.; Mohl, A. 2018. Danube, Drava, and Mura Rivers: The "Amazon of Europe". *The Wetland Book*. 903–909.

Hrvatski geološki institut 2009. *Ocjena stanja i rizika cjelina podzemnih voda u panonskom dijelu Republike Hrvatske*.

Hrvatske vode 2020. *Izveštje o stanju podzemnih voda u 2019. godini*.

Direktiva Vijeća (91/676/EEZ) od 12. prosinca 1991. o zaštiti voda od onečišćenja uzrokovanog nitratima iz poljoprivrednih izvora. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A01991L0676-20081211> (pristupljeno 4. veljače 2024).

Dadić, T. 2016. *Pronos nitrata u uvjetima automorfni i hidromorfni tala na primjeru sliva rijeke Vuke*. Doktorski rad. Građevinski fakultet Osijek. Osijek.

Domenico, P. A.; Schwartz, F. W. 1998. *Physical and Chemical Hydrogeology*. John Wiley & Sons, Inc.

FAO Corporate document repository 2016: Chapter 3: Crop water needs. <https://www.fao.org/home/en/> (pristupljeno 4. veljače 2024).

Filipović, V. 2012. *Primjena numeričkog modeliranja u procjeni kretanja vode i koncentracije nitrata u uvjetima hidromorfni tala*. Doktorski rad. Agronomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Zagreb.

Gjetvaj, G.; Lončar, G.; Malus, D.; Ocvirk, E. 2011. Primjeri međutjecaja površinskih i podzemnih voda. *Građevinar*. 63(11): 941–951.

Hantush, M. M.; Wang, M. 2003. Modeling Long-Term Nitrate Base-Flow Loading From Two Agricultural Watersheds. *Proceedings. AWRA Spring Specialty Conference Agricultural Hydrology and Water Quality*. Kansas City, MO. May 12 – 14, 2003.

Hooda, P. S.; Edwards, A. C.; Anderson, H. A.; Miller, A. 2000. A review of water quality concerns in livestock farming areas. *The Science of Total Environment*. 250:

143–167.

Jiang, Y. i Somers, G. 2009. Modeling effects of nitrate from non-point sources on groundwater quality in an agricultural watershed in Prince Edward Island. Canada. *Hydrogeology Journal*. 17: 707–724.

Jiang, Y.; Nishimura, P.; Van Den Heuvel, M. R.; Macquarrie, K. T. B.; Crane, C. S.; Xing, Z.; Raymond, B. G.; Thompson, B. L. 2015. Modeling land-based nitrogen loads from groundwater-dominated agricultural watersheds to estuaries to inform nutrient reduction planning. *J Hydrol*. 529: 213–230.

Matiatos, I. 2016. Nitrate source identification in groundwater of multiple land-use areas by combining isotopes and multivariate statistical analysis: A case study of Asopos basin (Central Greece). *Science of the Total Environment*. 541: 802–814.

Molénat, J.; Gascuel-Oudou, C. 2002. Modelling flow and nitrate transport in groundwater for the prediction of water travel times and of consequences of land use evolution on water quality. *Hydrol. Process*. 16: 479–492.

Niswonger, R. G.; Panday, S.; Ibaraki, M. 2011. MODFLOW-NWT, A Newton Formulation for MODFLOW-2005. Chapter 37 of Section A. *Groundwater Book 6. Modeling Techniques*. U.S. Geological Survey. Reston, Virginia.

Pravilnik o parametrima sukladnosti, metodama analiza i monitorinzima vode namijenjene za ljudsku potrošnju (NN64/2023), <https://narodne-novine.nn.hr/eli/sluzbeni/2023/64/pdf> (pristupljeno 4. veljače 2024).

Palmer, M.; Ruhi, A. 2019. Linkages between flow regime, biota, and ecosystem processes: Implications for river restoration. *Science*. Vol 365.

Rahman, A.; Mondal, N. C.; Tiwari, K. K. 2021. Anthropogenic nitrate in groundwater and its health risks in the view of background concentration in a semi arid area of Rajasthan, India. *Nature Journal*. 11: 9279.

Rodriguez-Galiano, V.; Mendes, M. P.; Garcia-Soldado, M. J.; Chica-Olmo, M.; Ribeiro, L. 2014. Predictive modeling of groundwater nitrate pollution using Random Forest and multisource variables related to intrinsic and specific vulnerability: A case study in an agricultural setting (Southern Spain). *Science of the Total Environment*. 476–477, 189–206.

Shah, N.; Nachabe, M.; Ross, M. 2007. Extinction Depth and Evapotranspiration from Ground Water under Selected Land Covers. *Ground Water*. 45(3): 329–338.

Šrajbek, M.; Kranjčević, L.; Kovač, I.; Biondić, R. 2022. Groundwater Nitrate Pollution Sources Assessment for Contaminated Wellfield. *Water*. 14: 255.

Tadić, L.; Tamás, E. A.; Mihaljević, M.; Janjić, J. 2022. Potential Climate Impacts of Hydrological Alterations and Discharge Variabilities of the Mura, Drava, and Danube Rivers on the Natural Resources of the MDD UNESCO Biosphere Reserve. *Climate*. 10: 1–17.

Takounjou, A. F.; Kuitcha, D.; Fantong, W. Y.; Ewodo, M. G. 2013. Assessing Groundwater Nitrate Pollution in Yaoundé, Cameroon: Modelling Approach. *World Appl Sci J*. 23: 333–344.

Trajković, S. 2009. Metode proračuna potreba za vodom u navodnjavanju. Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu. Niš.

Tziatzios, G.; Sidiropoulos, P.; Vasiliades, L.; Mylopoulos, N.; Loukas A. 2015. Simulation Of Nitrate Contamination In Lake Karla Aquifer. *Proceedings of the 14th International Conference on Environmental Science and Technology Rhodes*. Greece. September 3 – 5, 2015.

UNESCO, Mura-Drava-Danube Transboundary Biosphere Reserve, Croatia/Hungary. <https://en.unesco.org/biosphere/eu-na/mura-drava-danube> (pristupljeno 3. studenoga 2023.)

Zheng, C.; Hill, M. C.; Cao, G.; Ma, R. 2012. MT3DMS: Model Use, Calibration, And Validation. *Soil & Water Division of ASABE*. 55(4): 1549–1559.

IMPACTS OF AGRICULTURAL ACTIVITIES ON GROUNDWATER QUALITY IN THE AREA OF TRANSBOUNDARY BIOSPHERE RESERVE MURA-DRAVA-DANUBE

Abstract: Agricultural activities are widespread in the Karašica-Vučica catchment area, the northern part of the Mura-Drava-Danube Biosphere Transboundary Reserve (TBR MDD). A nitrate transport model was developed to estimate nitrate concentrations in groundwater within this area. Despite the high input values, the results showed low nitrate concentrations (<50 mg/L). The northern part of the catchment area bordering the TBR MDD showed the lowest nitrate levels. Considering the biodiversity and natural landscapes of the TBR MDD, special attention should be paid to potential contaminations, especially nitrates, due to their harmful effects. Given that the results represent an optimistic perspective, ongoing research, and monitoring are key to preserving the integrity of this ecologically significant area.

Key words: the Karašica-Vučica catchment area, Transboundary Biosphere Reserve Mura, Drava, Danube (TBR MDD), groundwater, nitrates

DER EINFLUSS DER LANDWIRTSCHAFT AUF DIE GRUNDWASSERQUALITÄT IM GEBIET DES GRENZÜBERSCHREITENDEN BIOSPHÄRENRESERVATS MUR-DRAU-DONAU

Zusammenfassung: Im Einzugsgebiet Karašica-Vučica, das zum grenzüberschreitenden Biosphärenreservat Mur-Drau-Donau gehört, ist die Landwirtschaft ein wichtiger Wirtschaftszweig. Um die Nitratkonzentrationen im Grundwasser in diesem Gebiet abzuschätzen, wurde ein Transportmodell für Nitrate entwickelt, die die Hauptursache der Grundwasserverschmutzung durch die Landwirtschaft sind. Es wurden hypothetische Werte des Eintrags von Nitratbelastungen in das Grundwasser in den trockensten und feuchtesten Jahren im Zeitraum von 2000 bis 2020 modelliert. Trotz der hohen Eingabewerte, die doppelt so hoch waren wie zulässig, zeigten die Ergebnisse im analysierten Teil des Wassereinzugsgebiet zwischen den Flüssen Karašica und Drau niedrige Nitratkonzentrationen (<50 mg/L). Der nördliche Teil des Einzugsgebietes, der an das Grenzschutzgebiet Mur-Drau-Donau-Biosphäre grenzt, wies die niedrigsten Nitratkonzentrationen auf. Angesichts der Artenvielfalt und der Naturlandschaften des grenzüberschreitenden Biosphärenreservats Mur-Drau-Donau sollte besonderes Augenmerk auf mögliche Verschmutzungen gelegt werden, insbesondere auf Nitrate wegen ihrer schädlichen Auswirkungen. Obwohl die Ergebnisse eine optimistische Perspektive darstellen, sind ständige Forschung und Überwachung der Schlüssel zur Erhaltung der Integrität dieses ökologisch bedeutsamen Gebiets.

Schlüsselwörter: Einzugsgebiet Karašica-Vučica, grenzüberschreitendes Biosphärenreservat Mur-Drau-Donau, Grundwasser, Nitrate

