

NUMERIČKO MODELIRANJE I ANALIZA PODZEMNIH VODA NA SLIVNOM PODRUČJU RIJEKE VUKE

doc. dr. sc. Tamara Brleković
Sveučilište u Osijeku,
Građevinski i arhitektonski
fakultet Osijek
Ulica Vladimira Preloga 3,
Osijek, Hrvatska
tamaradadic@gfos.hr

prof. dr. sc. Lidija Tadić,
dipl. ing. građ.
Sveučilište u Osijeku
Građevinski i arhitektonski
fakultet Osijek
Ulica Vladimira Preloga 3,
Osijek, Hrvatska

Numeričke 3D modele strujanja podzemnih voda karakterizira velika složenost, brojnost ulaznih podataka, ali i velika primjena. U ovom se radu vršilo modeliranje podzemnih voda na slivnom području rijeke Vuke u istočnom dijelu Hrvatske. Osnovne karakteristike ovog područja su automorfna i hidromorfna tla, vertikalna i horizontalna heterogenost geoloških slojeva, vegetacijski pokrov te brojne rijeke i kanali. Nakon uspostavljanja konceptualnog modela, model se pretvorio u numerički uz odgovarajuće matematičke izraze. Nakon kalibracije modela rađena je parametarska analiza koja je pokazala da najveći utjecaj na strujanje u analiziranim uvjetima ima infiltracija, koja je kalibracijom određena na 17% od ukupnih oborina palih na slivno područje. Ovo predstavlja važan podatak zbog toga što se promatrane vrste tla prihranjuju uglavnom oborinama, ali i zbog proračuna vodne bilance. Parametarska je analiza pokazala i da vrlo mali utjecaj na konačan rezultat kod ovakvih modela ima evapotranspiracija, unatoč tomu što je 70% sliva prekriveno vegetacijom.

Ključne riječi: podzemne vode, numerički model, slivno područje rijeke Vuke, infiltracija, evapotranspiracija

1. UVOD

S porastom svijesti o rastućoj potrebi za podzemnim vodama, ali i narušavanju njihove kvalitete i kvantitete, došlo je do razvoja različitih simulacijskih modela koji opisuju, ali i predviđaju, strujanje podzemnih voda i kretanje različitih onečišćivača (Peña-Haro i dr., 2011.; Ledoux i dr., 2007.; Lasserre i dr., 1999.; Chu i dr., 1987.). Modeli predstavljaju pojednostavljenu verziju realnog sustava i procesa koji se odvijaju unutar njega (Bear i Cheng, 2010.; Bordas, 2005.), a cilj modeliranja je rješavanje složenih problema koji se javljaju kod strujanja podzemnih voda. Upravo zbog te složenosti, prilikom modeliranja strujanja podzemnih voda i pronosa onečišćenja primjenjuju se numerički 3D modeli koji, uz analitičke, pripadaju skupini matematičkih modela (Rolle i dr., 2011.; Kaluđerović, 2009., Delleur, 1999.).

Prvi korak u procesu modeliranja je stvaranje konceptualnog modela koji sadrži opis fizikalnih, kemijskih i bioloških procesa promatranog sustava koji će biti uzeti u obzir prilikom modeliranja. U idućem se koraku konceptualni model prevodi u odgovarajuće matematičke izraze koji, zajedno s rubnim uvjetima vezanima za konceptualni model, čine matematički model (Bordas, 2005.).

Iako ove modele karakterizira složenost i veliki broj ulaznih podataka, njihova je primjena velika. Na kalibrirane modele strujanja podzemne vode često se nadograđuju modeli pronosa onečišćenja. Rezultati koji se dobiju modeliranjem strujanja, a to su razine i brzine podzemnih voda, služe kao ulazni parameter za model pronosa onečišćenja na promatranom području.

Osim toga, pomoću modela podzemnih voda često se definira i vodna bilanca, kvantificira nesaturirana zona, ali i definira prijelazna zona između riječnog korita i vodonosnika. Na temelju takvih modela određuje se infiltracija te protok i zapremnina vodonosnika. Vrlo su korisni i s aspekta zaštite okoliša, jer se pomoću njih mogu simulirati utjecaji promjene režima strujanja podzemnih voda na okoliš. Prilikom izgradnje, ili nadogradnje, vodoopskrbnog sustava određenog područja, ovakvim se modelima mogu simulirati različiti režimi crpljenja podzemnih voda te njihove dugoročne posljedice (Zhou i Li, 2015.; Selim i Ma, 1998.). Ako se nakon procesa kalibracije radi i parametarska analiza, dobiva se uvid u utjecaj i važnost pojedinih parametara na samo strujanje, s tim da parametarska analiza, kao i analiza osjetljivosti, mogu biti dio kalibracijske procedure.

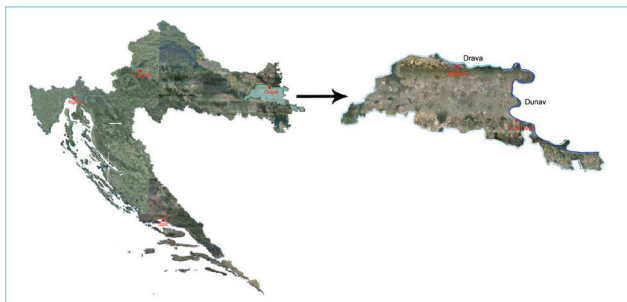
U ovom se radu modeliralo strujanje podzemne vode na području koje obuhvaća slivno područje rijeke Vuke. Ovo područje karakterizira veliki broj rijeka i kanala, automorfna i hidromorfna tla koja se prihranjuju uglavnom vodama oborinskog porijekla te veliki udio vegetacijskog pokriva. Kako bi se utvrdilo što najviše utječe na strujanje u ovakvim uvjetima, rađena je i parametarska analiza, dok je preko kalibracijskog postupka definirana infiltracija koja je izuzetno važan parametar kod ovakvih tala, ali i u vodnoj bilanci općenito. Kako je ovaj model služio za daljnje razmatranje pronosa onečišćivača uslijed poljoprivrednih aktivnosti, korišten je 3D model, iako se za regionalne modele najčešće koriste 2D modeli, jer vrijedi Dupuit-ova hipoteza, a i zahtijevaju manji broj ulaznih podataka.

2. MATERIJALI I METODE

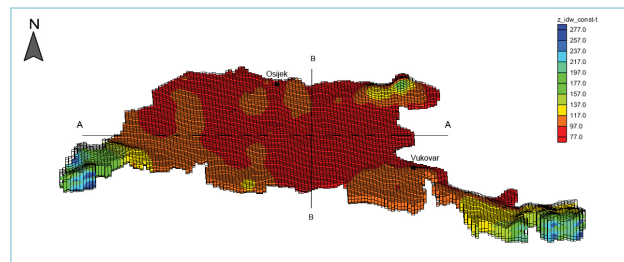
2.1. Opis područja

Slivno područje rijeke Vuke nalazi se u istočnom dijelu Hrvatske, na dijelovima područja Osječko-baranjske i Vukovarsko-srijemske županije (slika 1). Omeđeno je rijekom Dravom na sjeveru, Dunavom na istoku, a zapadna granica je vododjelnica sa slivom Karašica-Vučica. Ukupna površina sliva iznosi 1759 km², a podudara se sa rasprostiranjem Dravske potoline.

Prema topografskim karakteristikama, otprilike 10% pripada brdskom dijelu sliva, a 90% nizinskom.



Slika 1: Položaj slivnog područja rijeke Vuke



Slika 2: Nadmorske visine na slivnom području Vuke

Visine nizinskog dijela se kreću do 83,5 do 100 m n.m., dok u brdskom premašuju ili su veće od 250 m n.m. na obroncima Krndije i na krajnjem istoku sliva, što je prikazano na slici 2. U brdskom dijelu sliva izraženo je isklinjavanje vodonosnih slojeva (Bačani, 1997.).

Klima na ovom području je kontinentalna s hladnim zimama i toplim ljetima. Srednja godišnja temperatura za razdoblje od 1961. do 2015. god. iznosi 11,16° C, a srednja godišnja količina oborina za isto razdoblje iznosi 675 mm. Svi podaci se odnose na meteorološku postaju Osijek. Osim te postaje na području sliva nalazi se još i postaja u Vukovaru, no zbog kratkog i nepotpunog raspoloživog niza podataka kao mjerodavni se podatci uzimaju oni zabilježeni u Osijeku. Treba napomenuti da unutar zabilježenog niza podataka oborina i temperatura nedostaju 1991. i 1992. godina.

Osim oborine i temperature, evapotranspiracija je također vrlo važan pokazatelj, jer upućuje na količinu vode koja ispari sa slivne površine, a predstavlja sumarno isparavanje s tla i biljaka. Referentna evapotranspiracija izračunata je prema Blaney-Cridle metodi uzimajući u obzir podatke zabilježene na meteorološkoj postaji Osijek prema sljedećem izrazu (Doorenbos i Pruitt, 1977.):

$$ET_0 = c[p(0,46t + 8)] \quad (1)$$

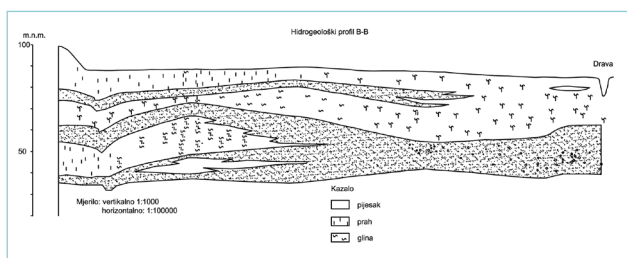
gdje je: c -korekcijski faktor ovisan o relativnoj vlažnosti zraka, trajanju sunčeve svjetlosti i brzini vjeta [-], p -mjesečni postotak dnevne svjetlosti [%], t -srednja mjesečna temperatura [°C].

Najveće vrijednosti su tijekom ljetnih mjeseci s maksimumom u srpnju, a najmanje u siječnju i prosincu.

Kako se promatrano slivno područje nalazi se na području Osječko-baranjske i Vukovarsko-srijemske županije, mjerodavne karte za određivanje vrste tla su pedološke karte te dvije županije. Na slivu rijeke Vuke ukupno se nalazi 18 tipova tala i njihovih nižih jedinica na razini podtipova, varijeteta i formi. Od tih 18 tipova, 9 pripada automorfnim, 8 hidromorfnim, a 1 subakvalnim tlima (Lončarić, 2014.).

Geološku podlogu brdskog dijela sliva rijeke Vuke čine naslage tercijske i kvartarne, dok doline koje se nalaze uz rijeku Vuku i veće pritoke izgrađuju pleistocensko-holocenski fluvijalni sedimenti pjeskovitih šljunaka pokrivenih prašinstim glinama. Na te fluvijalne naslage

se nadovezuju praporne prašnaste gline i kontinentalni prapor u središnjem dijelu sliva. Prema južnom dijelu sliva geološke podloge se sastoje od prapora, odnosno poroznog eolskog sedimenta pleistocena koji je podložan eroziji. Litološki sastav propusnih slojeva čine u većoj mjeri pijesak te u manjoj šljunak, a nepropusnih, odnosno slabopropusnih, prah i glina s dominacijom praha. Pijesak je sitno do srednjozrnast s jednoličnim koeficijentom ujednačenosti ($U=D_{60}/D_{10}$). Sitne valutice šljunka nalaze se obično pri dnu debljih pjeskovitih slojeva (Bačani, 1997.). Primjer jednog geološkog profila s analiziranog područja prikazan je u nastavku. Njegov položaj naznačen je na slici 2. Na profilu je vidljiva heterogena uslojenost te stanjenje i račvanje vodonosnih slojeva.



Slika 3: Geološki profil B-B (presjek naznačen na slici 2)

2.2. Model stacionarnog strujanja podzemnih voda

Prilikom kreiranja modela strujanja podzemnih voda korišten je program MODFLOW (engl. MODular three-dimensional finite difference groundwater FLOW model) u sklopu Grounwater Modeling System (GMS) okruženja. MODFLOW je razvijen 1980-ih godina unutar organizacije United States Geological Survey (USGS), a predstavlja računalni program za trodimenzionalni prikaz strujanja podzemnih voda u višeslojnim sredinama uz različite rubne uvjete. Strujanje može biti stacionarno i nestacionarno pri čemu vodonosnik može biti sa slobodnim vodnim licem ili pod tlakom. Proces i kao što su strujanje prema zdencima, prostorno prihranjivanje, evapotranspiracija te izmjena vode između vodotoka i vodonosnika također mogu biti simulirani.

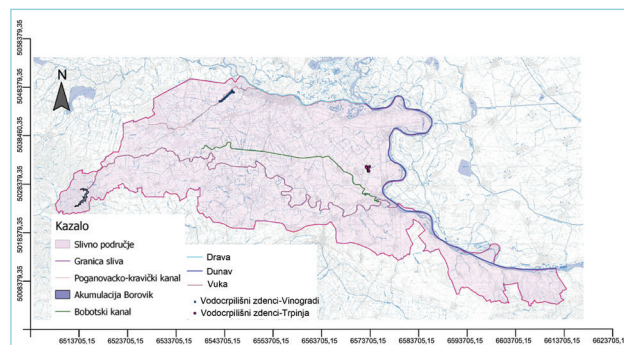
Jednadžba na kojoj se bazira trodimenzionalno strujanje podzemnih voda kroz porozni materijal glasi (Kumar, 2015.; Gjetvaj i dr., 2011.; Saghravani i Mustapha, 2011.; Kaluderović, 2009.; Tesfaye, 2009.; Harbaugh, 2005.; McDonald i Harbaugh, 1988.):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

gdje je: K_{xx} -hidraulička vodljivost (koeficijent filtracije) u pravcu x osi [m/s], K_{yy} -hidraulička vodljivost (koeficijent filtracije) u pravcu y osi [m/s], K_{zz} -hidraulička vodljivost (koeficijent filtracije) u pravcu z osi [m/s], h -

piezometarski nivo podzemne vode [m], S_s -koeficijent specifične izdašnosti [m⁻¹], W - protok po jedinici volumena vodonosnika u jediničnom vremenu koji predstavlja ulaz i izlaz vode u model (engl. *sources and sinks*)[m/s].

Kako je ranije navedeno, modeliranje započinje stvaranjem konceptualnog modela. On sadrži dominantne procese i podatke vezane uz ponašanje analiziranog sliva. Konceptualni model slivnog područja rijeke Vuke (slika 4) nastao je unošenjem GIS slojeva (*shapefile*) i odgovarajućih ulaznih podataka i rubnih uvjeta. Na sjevernoj i istočnoj granici rubne uvjete predstavljaju rijeke Drava i Dunav, dok je na ostalim granicama uvjet da nema tečenja okomito na konturu granice. Osim Drave i Dunava, u konceptualni model su uvršteni svi važniji i veći vodotoci na slivnom području, a to su rijeka Vuka, Bobotski kanal i Poganovačko-kravički kanal. Svi drugi manji vodotoci i kanali su njihovi pritoci pa su na indirektan način i oni uzeti u obzir prilikom stvaranja konceptualnog modela. Osim njih, dio modela je i akumulacija Borovik koja predstavlja najveću stajačicu na slivnom području. Navedeni vodotoci i jezero su, osim svojim položajem, opisani visinskim kotama dna i vodostajima. Kako bi se pravilno modelirala izmjena vode između vodotoka i vodonosnika, potrebni su podatci i o provodljivosti dna vodotoka. Osim vodnih tijela, u konceptualni model ulaze i sva veća crpilišta na promatranom području kojima se pridružuju podatci o količini crpljene vode (Dadić, 2016.). Na slivu rijeke Vuke to su crpilišta Vinogradi s 18 zdenaca i crpilište Trpinja kod Vukovara s 12 zdenaca. Svakom se zdencu pridružuje protok od 40 l/s (Bačani, 1997.).



Slika 4: Elementi konceptualnog modela slivnog područja rijeke Vuke

Provodljivost se računa općenito preko izraza:

$$C = \frac{k}{L} A = \frac{k}{t} lw \quad (3)$$

gdje je: C -provodljivost [m²/dan], k -hidraulička vodljivost [m/dan], w -širina vodnog lica [m], t -debljina sloja [m], lw -površina poprečnog presjeka [m²].

Provodljivost za dno vodotoka je izračunata preko gornjeg izraza prilagođenog za vodotoke, odnosno linijske

objekte (Mehl i Hill, 2010.; Barth, 2006.; Harbaugh i dr., 2000.):

$$C = \frac{k}{t} w \quad (4)$$

gdje je: C–provodljivost po jedinici duljine [(m²/d)/m], k–hidraulička vodljivost [m/dan], w–širina vodnog lica [m], t–debljina dna vodotoka [m].

Provodljivost dna jezera je određena na isti način, samo je formula (3) prilagođena za jedinicu površine zbog toga što je jezero predstavljeno u modelu kao poligonski objekt (Merritt i Konikow, 2000.):

$$C = \frac{k}{t} \quad (5)$$

gdje je: C– provodljivost po jedinici površine [(m²/d)/m²].

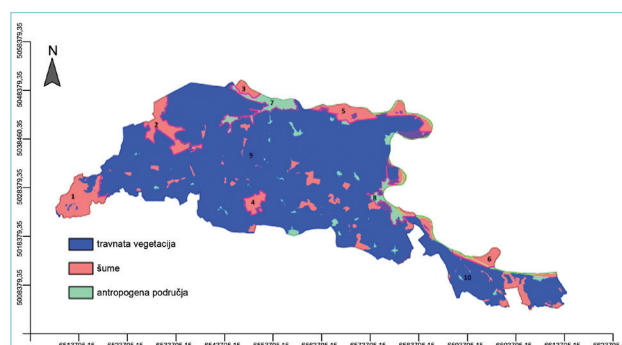
Vrijednosti parametara *k* i *t* za potrebe računanja provodljivosti preko izraza (4) i (5) preuzete su iz literature (Bara i dr., 2014.; Bačani, 1997.), a izračunate vrijednosti provodljivosti kanala i dna akumulacije Borovik iznose 200, a rijeke Vuke 407 (m²/d)/m.

Uz korišteni Dirichletov rubni uvjet, a to su zadane razine vode u rijekama Drava i Dunav, i podatke o vodotocima i jezeru, važan ulazni podatak je i infiltracija, čiji se intenzitet parametrizira kroz kalibraciju modela (Dadić, 2016.).

Evapotranspiracija je definirana srednjom vrijednosti obzirom na vegetacijsko razdoblje, te iznosi 0,0027 m/dan od travnja do listopada, a u ostalom, vanvegetacijskom razdoblju, iznosi 0,0011 m/dan. Evapotranspiracija je izračunata preko Blaney-Criddle metode uzimajući u obzir podatke zabilježene na meteorološkoj postaji Osijek. Osim same veličine evapotranspiracije koja se izražava u m/dan, za unos evapotranspiracije u model potrebna su još dva parametra, a to su ravnina evapotranspiracije (engl. *surface elevation*) i dubina slabljenja (engl. *extinction depth*). Ako razina podzemne

Tablica 1: Vrijednost dubine slabljenja u [cm] obzirom na vrstu tla i tip pokrova (Shah i dr., 2007.)

Vrsta tla	Tip pokrova zemljišta		
	Golo tlo	Travnata vegetacija	Šuma
Pijesak	50	145	250
Ilovasti pijesak	70	170	270
Pjeskovita ilovača	130	230	330
Pjeskovito-glinasta ilovača	200	300	400
Pjeskovita glina	210	310	410
Ilovača	265	370	470
Praškasta glina	335	430	530
Glinovita ilovača	405	505	610
Praškasta ilovača	420	515	615
Prah	430	530	630
Praškasto-glinovita ilovača	450	550	655
Glina	620	715	820



Slika 5: Poligoni s naznačenim brojem za definiranje dubine slabljenja

vode padne ispod dubine slabljenja, koja ovisi o vrsti tla i pokrovu, evapotranspiracije nema.

Ravnina evapotranspiracije je parametar koji ovisi o geometriji modela, odnosno o geometriji samog terena, jer se uobičajeno uzima da se ta ravnina poklapa sa površinom terena (Gannett i Lite Jr., 2004.). Vrijednost dubine slabljenja ovisi o vrsti tla i pokrova, što je i prikazano u tablici 1.

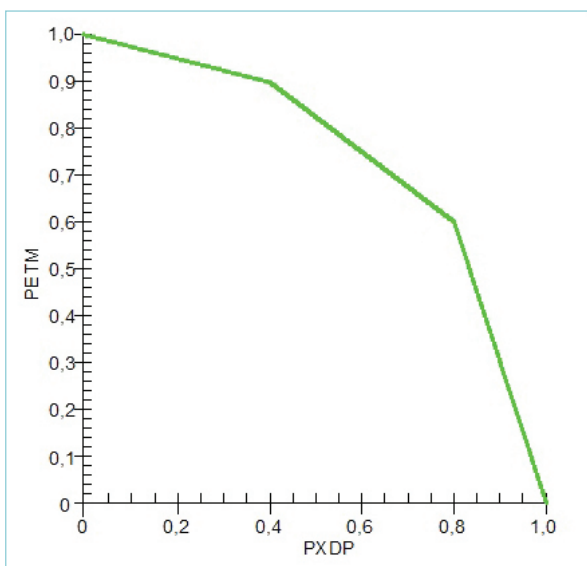
Tablica 2: Definirane vrijednosti dubina slabljenja za poligone

Redni broj poligona	Pokrov	Tip tla	Mehanički sastav tla	Dubina slabljenja [cm]
1	šuma	lesivirano	ilovasto-glinovito	610
2	šuma	lesivirano	ilovasto glinovito	610
3	šuma	lesivirano	ilovasto glinovito	610
4	šuma	lesivirano	ilovasto glinovito	610
5	šuma	aluvijalno	pjeskovito-ilovasto	330
6	šuma	aluvijalno	pjeskovito-ilovasto	330
7	antropogeno područje	lesivirano	ilovasto glinovito	405
8	antropogeno područje	euterično smeđe	ilovasto	265
9	trava	lesivirano, euterično smeđe, močvarno glejno	ilovasto, praškasto-ilovasto	432*
10	trava	černozem	praškasto-ilovasto	515

Kako bi se unijela u model točna vrijednost dubine slabljenja, potrebno je definirati područja s različitim tipovima tla i pokrovom. Tip tla je preuzet s pedološke karte županija, a pokrov tla iz Corine Land Cover (CLC) baze podataka. Poligoni s različitim pokrovima tla kreirani su pomoću navedene baze i GIS alata (slika 5) i unešeni u model kao poseban *shapefile* sloj. Na ovaj su način u model uvršteni tipovi tla na slivnom području opisani ranije, kao i njihova prostorna rasprostranjenost.

Uzimajući u obzir pokrov zemljišta, vrstu tla, definirane dubine slabljenja su prikazane u tablici 2 koje su povezane s naznačenim poligonima u modelu.

Evapotranspiracija se odvija u maksimalnom iznosu kada je razina podzemne vode na ili iznad ravnine evapotranspiracije. Ako razina vode padne ispod dubine slabljenja, evapotranspiracija je 0. Između te dvije točke evapotranspiracija može varirati linearno ili nelinearno. Prema (Shah i dr., 2007.), nelinearno ponašanje bolje opisuje ponašanje evapotranspiracije u realnim uvjetima pa je definirano u modelu nelinearnim segmentnim krivuljama. Početak i kraj segmenata definirani su udjelom (od 0 do 1) dubine slabljenja (PXDT koordinata)



Slika 6: Nelinearna segmentna krivulja korištena u modelu

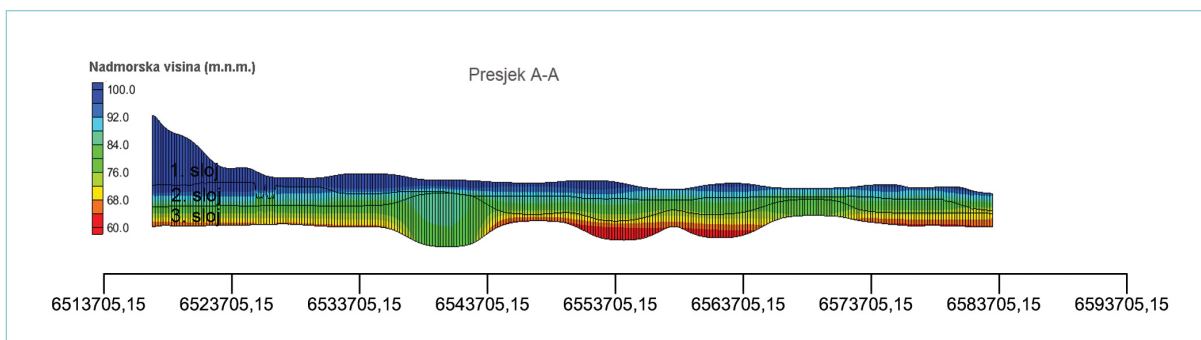
i udjelom evapotranspiracije (PETM koordinata). Dubina slabljenja iznosi 0 u ravni evapotranspiracije, a na dnu intervala 1, dok je veličina evapotranspiracije 1 u ravni, a na dnu intervala 0. Izgled krivulje korištene u modelu prikazan je na slici 6.

Važan dio konceptualnog modela čine slojevi tla. Ovo područje karakterizira velik broj slojeva i velika heterogenost u naslagama. Kako bi se takav složeni realni sustav transformirao u konceptualni, a zatim i numerički model, potrebno je uvesti određena pojednostavljenja u vidu grupiranja sličnih naslaga ili zanemarivanja tankih proslojaka i manjih leća. Tako su na području sliva rijeke Vuke izdvojena tri sloja (slika 7). Prvi se sloj, kao i treći, sastoji od slabopropusnih naslaga praha i gline gdje je vrijednost hidrauličke vodljivosti 0,00864 m/dan, dok drugi sloj čini pijesak. Vrijednost hidrauličke vodljivosti drugog sloja iznosi 15,42 m/dan. Vrijednosti su usvojene na temelju opisa slojeva tla prema Bačani, 1997. Za sve slojeve i zone vrijednosti efektivne poroznosti iznose 0,2, ukupne poroznosti 0,25 i vertikalne anizotropije 10 (Gjetvaj i dr., 2011.).

Preko 3D mreže gdje se unosi veličina ćelija u sva tri smjera, konceptualni model se pretvara u numerički uz odgovarajuće matematičke izraze, (2) dok se točnost izlaznih rezultata postiže kalibracijom modela (Dadić, 2016.).

3. REZULTATI I RASPRAVA

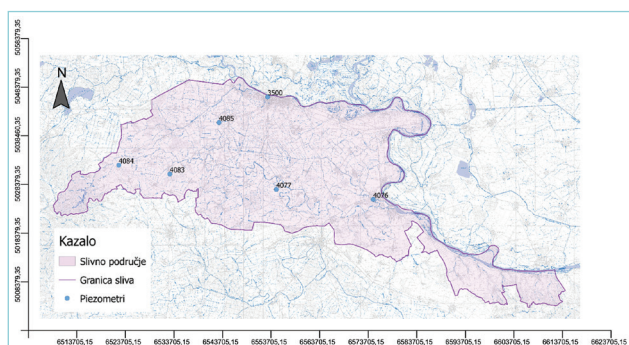
Simulacija strujanja podzemnih voda rađena je Newtonovom metodom proračuna (engl. *Newton solver*). Iako programski paket MODFLOW u okruženju GMS-a nudi nekoliko različitih metoda proračuna, zbog složenosti i veličine promatranog područja odabrana je Newtonova kako bi model što lakše konvergirao. Namijenjena je rješavanju nelinearnih problema koji uključuju isušivanje i ponovno vlaženje (engl. *drying and rewetting*) unutar nesaturiranog sloja. Korištenjem ove metode proračuna generira se nesimetrična matrica, dok je preko drugih metoda moguće samo generiranje simetrične matrice. Koristi se zajedno s Upstream-Weighting (UPW) paketom koji služi za proračun provodljivosti između ćelija mreže modela. Za razliku od drugih paketa, koji koriste diskretan pristup rješavanju problema isušivanja i ponovnog



Slika 7: Prikaz poprečnog profila slojeva tla analiziranog slivnog područja (presjek naznačen na slici 2)

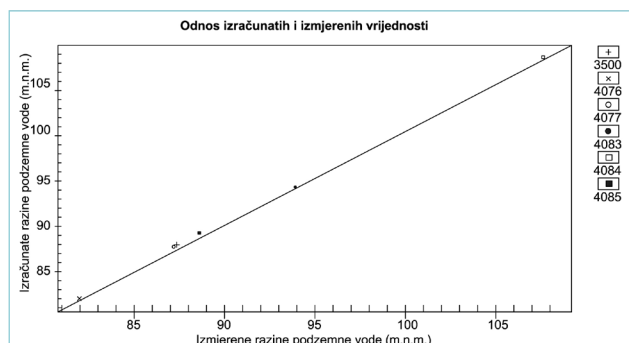
vlaženja ćelija, UPW paket koristi kontinuiranu funkciju kolebanja razina podzemnih voda (Niswonger, 2011.).

Kalibracija je rađena sve dok se nisu dobile zadovoljavajuće vrijednosti razine podzemnih voda na 6 lokacija. Vrijednosti razine podzemnih voda na tim lokacijama mjerene su od strane Državnog hidrometeorološkog zavoda. Lokacije piezometara korištenih za kalibraciju modela prikazane su na slici 8. Piezometri su odabrani, osim po odgovarajućoj lokaciji, i po raspoloživom nizu izmjerenih razina podzemne vode.



Slika 8: Lokacije piezometara korištenih za kalibraciju

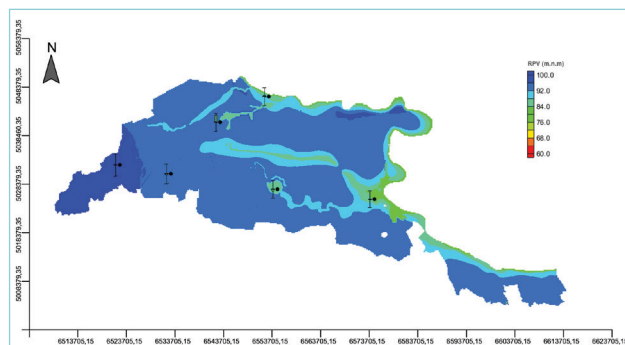
Kako bi se dobilo što točnije poklapanje, varirani su sljedeći parametri: hidraulička vodljivost slojeva tla s inkrementom od 0,0001 za prvi i treći sloj, dok je za drugi sloj korišten inkrement od 0,5, provodljivost dna rijeke Vuke, kanala i akumulacije, infiltracija, veličina evapotranspiracije te ravnina evapotranspiracije. Parametri su odabrani obzirom na kritičnost i sigurnost u njihovu točnu vrijednost. Iz toga se razloga mijenjala i razina u kanalima i akumulaciji koji su sastavni dio modela, a ne rubni uvjeti, jer su na raspolaganju bile samo izračunate normalne dubine. Točnost postignuta kalibracijom, odnosno poklapanje izmjerenih i izračunatih vrijednosti razina podzemne vode prikazana je na slici 9. Na slici se vidi poklapanje na svih 6 piezometara, odnosno da izmjerene vrijednosti odgovaraju modeliranim.



Slika 9: Odnos izračunatih i izmjerenih vrijednosti razina podzemnih voda na piezometrima

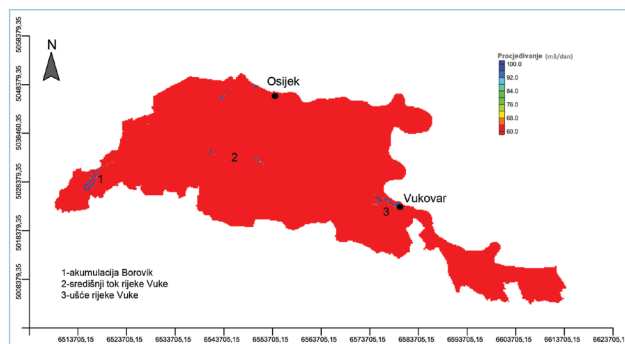
Važno je istaknuti da je kalibracijom definirana i vrijednost infiltracije oborina u tlo, odnosno veličina prihranjivanja podzemne vode. Određeno je da iznosi 17% od ukupnih oborina palih na slivno područje. Kako na analiziranom području prevladavaju automorfna i hidromorfna tla kod kojih se vlaženje odvija uglavnom preko oborina, ovaj podatak predstavlja važnu komponentu obzirom na proračun vodne bilance.

Rezultati modela nakon kalibracije pokazuju sniženje razine podzemne vode od zapada prema istoku. Razine podzemne vode su najviše oko akumulacije Borovik i iznose oko 120 m n.m. Na južnoj granici razine su između 95 i 96 m n.m. U središnjem dijelu opet prevladavaju niže razine, između 85 i 90 m n.m. Najniže su uz istočnu granicu sliva, odnosno uz rijeku Dunav u granici od 78 do 82 m n.m (slika 10).



Slika 10: Razine podzemnih voda

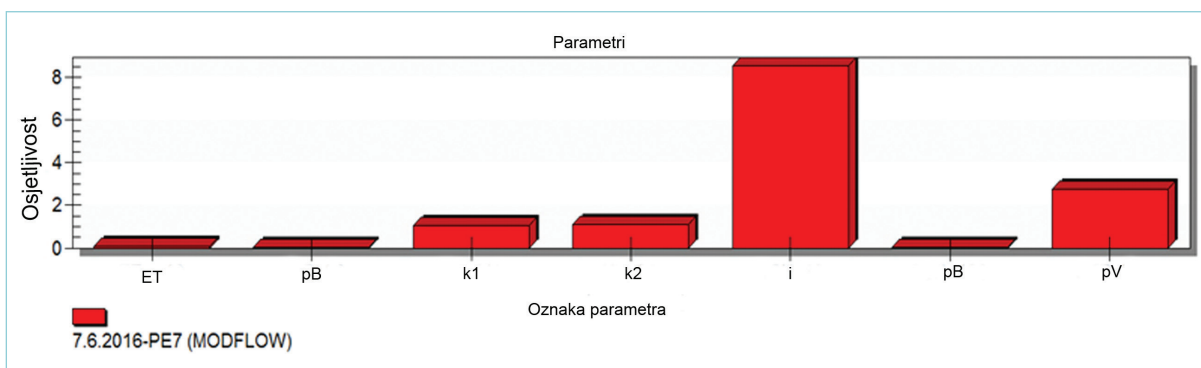
Obzirom na sniženje razine prema sjevernom i istočnom dijelu sliva gdje su smještene rijeke Drava i Dunav, jasno je da rijeke u uvjetima srednjih voda ne prihranjuju podzemlje, nego da isključivo tu ulogu imaju oborine. Obzirom na visoke udjele gline u tlu te malu propusnost krovine, odnosno prvog sloja, rijeka Vuka, ali i Bobotski i Poganovačko-kravički kanali samo u vrlo uskom pojasu prihranjuju vodonosni kompleks, što je je i prikazano na slici 11 gdje je razlučena interakcija vodotoka i podzemnih voda. Plavom je bojom označeno njihovo prihranjivanje podzemnih voda i može se zaključiti da je ono isključivo lokalnog karaktera (središnji tok i ušće rijeke Vuke te akumulacija Borovik).



Slika 11: Procjeđivanje iz vodotoka i akumulacije u podzemlje

Tablica 3: Vrijednosti za parametarsku analizu

Parametar	Oznaka	Optimalna vrijednost	Minimalna vrijednost	Maksimalna vrijednost
Hidraulička vodljivost 2. sloja [m/dan]	k2	20,0	0,0001	1000,0
Hidraulička vodljivost 1. sloja [m/dan]	k1	0,007	0,0001	1000,0
Provodljivost dna akumulacije Borovik [m/dan]	pB	800,0	1,0	100000,0
Provodljivost dna rijeke Vuke [m/dan]	pV	100,0	0,01	10000,0
Infiltracija [m/dan]	i	0,0003	1,0e-010	100,0
Veličina evapotranspiracije [m/dan]	ET	0,003	1,0e-010	10000,0
Provodljivost dna Bobotskog kanala [m/dan]	pB	200	0,01	10000,0



Slika 12: Rezultati parametarske analize

Na takvom kalibriranom modelu rađena je parametarska analiza kako bi se utvrdio utjecaj pojedinog parametra na rezultat. Ona daje uvid u veličinu utjecaja pojedinog ulaznog parametra na konačan rezultat. Za stacionarni model strujanja podzemnih voda provedena je automatska parametarska analiza pomoću paketa PEST koji je sastavni dio MODFLOW programa. Ovaj paket radi pomoću inverznog modela koji predstavlja alat za automatiziranje procesa procjene parametara. Rezultat PEST analize je osjetljivost svakog parametra. Za svaki odabrani parametar definiran je interval kao i njegova optimalna vrijednost, što je prikazano u tablici 3.

Rezultati provedene parametarske analize nalaze se na slici 12. Pokazuju da najveći utjecaj, odnosno najveću osjetljivost, na režim strujanja podzemnih voda ima infiltracija, odnosno količina procjedenih oborina. Veliki utjecaj imaju i hidraulička vodljivost slojeva, kao i provodljivost dna vodotoka na području sliva. Najmanji utjecaj od analiziranih parametara imaju evapotranspiracija, provodljivost dna kanala i provodljivost dna akumulacije.

Obzirom na karakteristike analiziranog područja, vrste tla, rubne uvjete u sl., nemaju uvijek isti parametri najveći utjecaj na rezultate simulacija strujanja podzemne vode. U radu (Ahuja, 2008.) je navedeno da prilikom promjene iznosa infiltracije dolazi do manjih promjena u razinama podzemne vode u neposrednoj blizini promatrane rijeke, dok su te promjene veće kako se udaljenost od rijeke povećava. Autori koji su istraživali

utjecaj pojedinog parametra, ovisno o prostornom položaju, zaključili su da prilikom mijenjanja iznosa hidrauličke vodljivosti, promjene razine podzemne vode se događaju u smjeru strujanja, dok se promjene razine podzemne vode uzrokovane infiltracijom šire radialno (Mazzilli i dr., 2010.). Parametarska analiza rađena na kalibriranom modelu koji obuhvaća vodonosnik zajedno s još 3 sloja tla područja u Indoneziji je pokazala da na razine i strujanje podzemnih voda najveći utjecaj ima horizontalna hidraulička vodljivost slojeva i infiltracija, a najmanji vertikalna hidraulička vodljivost (de Rover, 2015.). Modelom kojim analizirana mogućnost navodnjavanja područja u Indiji je također pokazano da su rezultati najosjetljiviji na promjene u infiltraciji (Srvanathi i dr., 2015.). Unatoč različitim vrstama tla i vodonosnika, kao i klimatskim značajkama, ipak se može zaključiti da je infiltracija jedan od najutjecajnijih parametara na strujanje podzemnih voda, što je potvrđeno i ovim radom.

Rezultati ovakve analize upućuju i na parametre koji imaju malo ili nimalo utjecaja na konačni rezultat. Ovdje je takav slučaj s evapotranspiracijom. Unatoč tomu što je, prema CLC bazi podataka, više od 70% slivne površine pod vegetacijskim pokrovom, iznos evapotranspiracije ima jako mali utjecaj na bilancu s aspekta podzemnih voda. Kako bi se ET uopće unijela u model, potrebno je definirati, osim samog iznosa u (m/dan), još i ravninu ET i dubinu slabljenja. Ravnina ovisi o geometriji modela, a dubina slabljenja o vrsti

i pokrovu tla. Vrsta tla se iščitava s pedološke karte, a za definiranje pokrova potrebna je CLC baza podataka, a ta dva parametra se preklapaju pomoću GIS alata. Još je potrebno odrediti međusobnu ovisnost iznosa ET, ravnine ET i dubine slabljenja za što se koristila nelinearna segmentna krivulja. U svakom slučaju, ET je najzahtjevniji parametar za određivanje, a ima jako mali utjecaj na rezultat.

4. ZAKLJUČAK

U radu je provedeno trodimenzionalno numeričko modeliranje podzemne vode na slivnom području rijeke Vuke. Ovo je područje odabrano zbog kombinacije automorfni i hidromorfni tala, vegetacijskog pokrova te rijeka i kanala koji se nalaze na slivu. Kod numeričkih modela postoji nekoliko metoda proračuna, ali se pokazalo da prilikom modeliranja takvih složenih sustava koji pokrivaju velika heterogena područja i veliki broj ulaznih podataka, najbolje odgovara Newtonova metoda radi konvergiranja samog modela prilikom simulacije. Obzirom na poklapanje postignuto kalibracijom, predloženi model uspješno opisuje strujanje podzemne vode u analiziranim hidropedološkim i hidregeološkim uvjetima automorfni i hidromorfni tala.

Dobiveni model je pokazao sniženje razine podzemne vode od zapada prema istoku s procjeđivanjem lokalnog

karaktera iz vodotoka i akumulacije u podzemlje. Na kalibriranom modelu rađena je parametarska analiza kako bi se utvrdio utjecaj pojedinog parametra na konačne rezultate. Na sam tok podzemne vode najveći utjecaj ima infiltracija, odnosno količina oborina kojom se prihranjuje tlo i vodonosnik. Procesom kalibracije definirana je vrijednost infiltracije, a iznosi 17% ukupnih oborina za analiziranim vrstu tla i pokrova. Ovaj je podatak izuzetno važan obzirom na to da se ovakva tla prihranjuju uglavnom oborinama, a vrlo je važno i za proračun vodne bilance odrediti veličinu infiltracije. Osim što ovakva analiza pokazuje parametere koji najviše utječu na rezultat strujanja podzemnih voda, jednako je važan i koristan pokazatelj parametara koji imaju najmanji utjecaj, a to su evapotranspiracija te provodljivost dna kanala, što je važno za područja s kanalskom mrežom. Obzirom na potrebnu količinu podataka i vremena kako bi se evapotranspiracija unijela u model, i na mali utjecaj koji ima na konačan rezultat, unatoč tome što vegetacija pokriva 70% površine sliva, preporučeno je izostavljati je iz proračuna, a s većom preciznošću unositi i definirati infiltraciju i hidrauličku provodljivost dna rijeka.

Ovakvi modeli mogu biti od regionalne važnosti jer se njima može utvrditi, ne samo infiltracija oborina koja predstavlja prihranjivanje vodonosnika, nego i zalihе vode u tim vodonosnicima. ■

LITERATURA

- Ahuja, S. (2015.): Arsenic Contamination of groundwater, Mechanism, Analysis, and Remediation. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Baćani, A. (1997.): Značajke hidrauličkih granica vodonosnih slojeva na vododjelnici Savskog i Dravskog porječja u istočnoj Slavoniji. Disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Bara, M.K., Velísková, Dulovičová R., Schügerl, R., (2014.): Influence of surface water level fluctuation and riverbed sediment deposits on groundwater regime. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 62(3), 177-185. doi: 10.2478/johh-2014-0030.
- Barth, G. (2006.): Adjusting Canal Conductance to Represent Drought Effect in a Regional Groundwater simulation. *Conference Proceedings MODFLOW and More* (ur. P. Hill), 552-556.
- Bear, J., Cheng, A.H.-D. (2010.): Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport, Springer Dordrecht Heidelberg London New York, doi 10.1007/978-1-4020-6682-5.
- Bordas, J.M. (2005.): Modeling groundwater flow and contaminant transport in fractured aquifers. Disertacija, Air Force Institute of Technology, Ohio.
- Chu, W., Strecker, E.W., Lettenmaier, D.P. (1987.): An Evaluation of Data Requirements for Groundwater Contaminant Transport Modeling. *Water Resource Research*, 23 (3), 408-424.
- Dadić, T. (2016.): Pronos nitrata u uvjetima automorfni i hidromorfni tala na primjeru sliva rijeke Vuke. Disertacija, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek, Osijek.
- Delleur, J.W. (1999.): *The Handbook of Groundwater Engineering*, Boca Raton, U.S.A.: CRC Press LLC.
- de Rover, S. (2015.): Modelling the Jakarta groundwater system: A Sensitivity Analysis. Diplomski, Universiteit Twente, Nizozemska.
- Doorenbos, J.; Pruitt, W.O. (1977.): Guidelines for predicting crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 24.
- Gannett, M.W.; Lite Jr.; K.E. (2004.): Simulation of Regional Ground-Water Flow in the Upper Deschutes Basin, Oregon, Water-Resources Investigations Report 2003-4195, USGS.
- Gjetvaj G.; Lončar, G.; Malus, D.; Ocvirk, E. (2011.): Primjeri međuutjecaja površinskih i podzemnih voda. *Građevinar*, 63 (11), 941-951.
- Harbaugh, W.A. (2005.): Derivation of the finite-difference equation. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Ch. 2.

- Harbaugh, A.W.; Banta, E.R.; Hill, M.C.; McDonald M.G. (2000.): Modflow-2000. The U.S. Geological Survey modular ground-water-User guide to modularization concepts and the ground-water flow process, Open file Report 00-92, USGS, Reston, Virginia.
- Kaluđerović, D. (2009.): 3D matematički modeli kretanja podzemnih voda i transporta zagađenja u hidrogeologiji. AGM knjiga, Beograd.
- Kumar, C.P. (2015.): Modelling of Groundwater Flow and Data Requirements. *International Journal of Modern Sciences and Engineering Technology*, 2 (2), 18-27.
- Lasserre, F.; Razack, M.; Banton, O. (1999.): A GIS-linked model for the assessment of nitrate contamination in groundwater. *Journal of Hydrology*, 224, 81-90.
- Ledoux, E.; Gomez, E.; Mognet, J.M.; Viavattene, C.; Viennot, P.; Ducharne, A.; Benoit, M.; Mignolet, C.; Schott, C.; Mary, B. (2007.): Agriculture and groundwater nitrate contamination in the Seine basin. The STICS-MODCOU modelling chain, *Science of the Total Environment*, 375, 33-47. doi:10.1016/j.scitotenv.2006.12.002.
- Lončarić, Z. (2014.): Plodnost i opterećenost tala u pograničnome području. Poljoprivredni fakultet Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.
- Mehl, S.; Hill, M.C. (2010.): Grid-size dependence of Cauchy boundary conditions used to simulate stream-aquifer interactions. *Advances in Water Resources*, 33, 430-442. doi:10.1016/j.advwaters.2010.01008.
- Merritt, M.L.; Konikow, L.F. (2000.): Documentation of a Computer Program to Simulate Lake-Aquifer Interaction Using the MODFLOW Ground-Water Flow Model and the MOC3D Solute-Transport Model. *U.S. Geological Survey Water-Resources Investigation Report 00-4167*, Tallahassee, Florida.
- Mazzilli, N.; Guinot, V.; Jourde H. (2010.): Sensitivity analysis of two-dimensional steady-state aquifer flow equations. Implications for groundwater flow model calibration and validation. *Advances in Water Resources*, 33(8), 905-922. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.04.014>
- McDonald, M.G.; Harbaugh, A.W. (1988.): A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. *Report 06-A1*, U.S. Geological Survey Publication.
- 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.
- Peña-Haro, S.; Pulido-Velazquez, M.; Llopis-Albert, C. (2011.): Stochastic hydro-economic modeling for optimal management of agricultural groundwater nitrate pollution under hydraulic conductivity uncertainty. *Environmental Modelling & Software*, 26, 999-1008. doi:10.1016/j.envsoft.2011.02.010.
- Rolle, M.; Maier, U.; Grathwohl, P. (2011.): Contaminant fate and reactive transport in groundwater. *Dealing with Contaminated Sites (from Theory towards Practical Application)* (ur. F. Swartjes), Poglavlje 19, 851-885, Springer.
- Saghravani, S.R.; Mustapha, S. (2011.): Prediction of Contamination Migration in an Unconfined Aquifer with Visual MODFLOW: A Case Study. *World Applied Sciences Journal*, 14 (7), 1102-1106.
- Selim, H.M.; Ma, L. (1998.): Physical Nonequilibrium in Soils, Modeling and Application. Ann Arbor Press, Chelsea, Michigan
- Shah, N.; Nachabe, M.; Ross, M. (2007.): Extinction Depth and Evapotranspiration from Ground Water under Selected Land Covers. *Ground Water*, 45 (3), 329-338.
- Sravanthi A.; Sambaiah A.; Ravi Babu G.; Edukondalu L. (2015.): Sensitivity Analysis of Modflow Used For the Simulation of Ground Watertable Fluctuations. *International Journal of Agriculture Sciences*, 7 (13), 828-833.
- Tesfaye, A. (2009.): Steady-state groundwater flow and contaminant transport modelling of Akaki wellfield and its surrounding catchment (Addis Ababa, Ethiopia). Disertacija, International Institute for geo-information science and Earth observation, Nizozemska.
- Zhou, Y.; Li, W. (2015.): A review of regional groundwater flow modeling. *Geoscience Frontiers*, 2(2), 205-214. doi:10.1016/j.gsf.2011.03.003.

Numerical modelling and groundwater analysis in the Vuka river basin

Abstract. 3D numerical models of groundwater flow are characterised by great complexity and numerous input data but also high applicability. The paper presents groundwater modelling in the Vuka river basin in eastern Croatia. The key features of this area are automorphic and hydromorphic soils, vertical and horizontal heterogeneity of geological strata, vegetation cover and numerous rivers and canals. Following the establishment of the conceptual model, we turned it into a numerical model using appropriate mathematical expressions. After the model calibration, we conducted a parameter analysis that revealed infiltration as having the highest impact on the flow in the analysed conditions, which was determined as 17% of the total precipitation that occurred in the river basin by the calibration. This is important data since the observed soil types are recharged mostly through precipitation, but also for purposes of water balance calculation. The parameter analysis showed that evapotranspiration has very low impact on the final result in such models despite 70 % vegetation cover in the basin.

Key words: groundwater, numerical model, Vuka river basin, infiltration, evapotranspiration

Numerische Grundwassermodellierung und -analyse im Flussgebiet der Vuka

Zusammenfassung. Numerische 3D-Modellierung der Grundwasserströmung ist durch hohe Komplexität und Vielzahl von Eingabedaten, aber auch durch große Änderungen charakterisiert. In dieser Arbeit wurde das Grundwasser im Flussgebiet der Vuka im östlichen Kroatien modelliert. Die Grundmerkmale dieses Gebietes sind automorphe und hydromorphe Böden, vertikale und horizontale Heterogenität geologischer Schichten, Vegetationsdecke und zahlreiche Flüsse und Kanäle. Erstens wurde ein Konzeptmodell erstellt, das in ein numerisches Modell mit entsprechenden mathematischen Ausdrücken umgesetzt wurde. Nach der Modellkalibrierung wurde eine parametrische Analyse durchgeführt, die zeigte, dass Infiltration die größte Auswirkung auf die Strömung unter den analysierten Bedingungen hat. Die Infiltration wurde auf 17 Prozent der Gesamtniederschlagsmenge im Flussgebiet durch Kalibrierung festgestellt. Das ist eine wichtige Angabe, erstens, weil die beobachteten Bodentypen meistens durch Niederschlag gewässert werden, und zweitens, diese Angabe ist für die Wasserbilanzberechnungen erforderlich. Die parametrische Analyse zeigte auch, dass Evapotranspiration eine geringe Auswirkung auf das Endergebnis bei solchen Modellen hat, obwohl 70 Prozent des Flussgebietes mit Vegetation bedeckt ist.

Schlüsselwörter: Grundwasser, numerisches Modell, Flussgebiet der Vuka, Infiltration, Evapotranspiration