

Modeliranje napajanja vodonosnika v zaledju izvira Rižane z območja Brkinov

Modelling the recharge of the aquifer in the Rižana catchment from Brkini area.

MITJA JANŽA

Geološki zavod Slovenije, Dimičeva 14, 1000 Ljubljana; Slovenija,
E-mail: mitja.janza@geo-zs.si

Received: June 22, 2005 Accepted: November 24, 2005

Izvleček: V članku je opisan dinamičen hidrološki model z distribuiranimi parametri (MIKE SHE-MIKE 11), izdelan na območju Brkinov - delu napajalnega območja vodonosnika v zaledju izvira Rižane. Rezultat modela je prostorsko in časovno porazdeljeni simulirani odtok z območja Brkinov, ki posredno napaja vodonosnik. Značilnosti odtoka, določene na podlagi simuliranih dnevnih odtokov za enajstletno obdobje (od 1.1.1983 do 31.12.1993), so opisane s statistikami: povprečni odtok $0,970 \text{ m}^3/\text{s}$, standardni odklon odtokov $2,327 \text{ m}^3/\text{s}$, minimalni odtok $0,012 \text{ m}^3/\text{s}$, maksimalni odtok $30,534 \text{ m}^3/\text{s}$, mediana $0,288 \text{ m}^3/\text{s}$, petindvajseti percentil $0,129 \text{ m}^3/\text{s}$, petinsedemdesetini percentil $0,531 \text{ m}^3/\text{s}$, cenilka asimetričnosti $5,230$ in cenilka sploščenosti $36,943$.

Abstract: In this paper a dynamic distributed hydrological model (MIKE SHE-MIKE 11) that was developed in the area of Brkini (part of the recharge area of the aquifer of Rižana spring) is described. The result of the model is spatially distributed and temporally variable simulated outflow from the Brkini area that indirectly recharges the aquifer. Characteristics of the outflow, defined on the daily simulated outflows for eleven years period (from 1. 1. 1983 to 31. 12. 1993), are described by statistics: average outflow $0.970 \text{ m}^3/\text{s}$, standard deviation $2.327 \text{ m}^3/\text{s}$, minimum outflow $0.012 \text{ m}^3/\text{s}$, maximum outflow $30.534 \text{ m}^3/\text{s}$, median $0.288 \text{ m}^3/\text{s}$, 25 percentile $0.129 \text{ m}^3/\text{s}$, 75 percentile $0.531 \text{ m}^3/\text{s}$, skewness 5.230 and kurtosis 36.943 .

Ključne besede: napajanje vodonosnika, hidrološki model, MIKE SHE, Brkini, izvir Rižane, Slovenija.

Key words: aquifer recharge, hydrological model, MIKE SHE, Brkini, Rižana spring, Slovenia.

Uvod

Izvir reke Rižane je najpomembnejši vir pitne vode na območju slovenske Obale. Pojavlja se na kontaktu med vodonosnimi paleogenskimi apnenci in slabo prepustnimi eocenskimi flišnimi plastmi. Po svojih značilnostih je tipični kraški izvir. Zaledje izvira je del

obsežnega kraškega sistema, ki se začenja na zahodu s Krasom in na vzhodu končuje v Kvarnerskem zalivu. Sistem izvira Rižane tvori osrednji del, od koder odtekajo podzemne vode proti Tržaškemu zalivu, Kvarnerju, proti jugu pa izvirajo kot Rižana ali pa obnavljajo vodonosne plasti apnencev pod flišnim pokrovom proti Dragonji (PRESTOR, 1992).

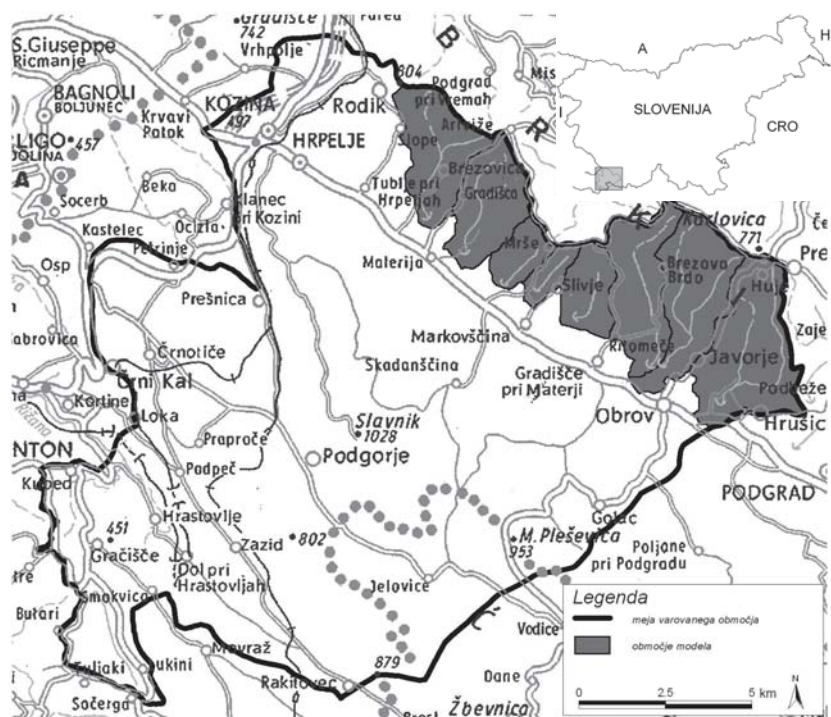
Vodnosnik v zaledju izvira Rižane neposredno napajajo padavine, posredno pa voda potokov, ki pritečejo z območja Brkinov in poniknejo na stiku fliša s karbonatnimi kamninami. Dotok ponikajočih voda potokov v izvir Rižane dokazujejo sledilni poskusi (KRIVIC ET AL., 1987; KRIVIC ET AL., 1989; NOVAK, 1963). Zaradi hitrega dospetja sledila iz območja ponikanja do izvira (štiri do šest dni) je to območje izjemnega pomena za varovanje vodnega vira in je uvrščeno v ožje vodovarstveno območje.

V članku je opisana ocena količine posrednega napajanja vodnosnika v zaledju izvira Rižane z območja Brkinov. Ocena temelji na hidrološkem modelu (MIKE SHE-MIKE 11), ki je bil izdelan na osnovi novo pridobljenih podatkov o pretokih v obdobju

od 1. 11. 2001 do 31. 3. 2003. Prednost uporabe modela je možnost simulacije prostorske in časovne spremenljivosti napajanja. S pomočjo modela pridobljene nove informacije so bile kasneje vključene kot robni pogoj v model vodnosnika v zaledju izvira Rižane (JANŽA, 2003), s katerim so bili simulirani pretoki izvira v obdobju od 1. 1. 1983 do 31. 12. 1993.

OBRAVNAVANO OBMOČJE

Obravnvano območje Brkinov obsega severovzhodni del z varstvenimi pasovi varovanega zaledja izvira Rižane (sl. 1). Sestavljeno je iz osmih povodij s skupno površino 44,39 km² (sl. 2). Gradijo ga flišne kamnine in se po hidrogeoloških lastnostih



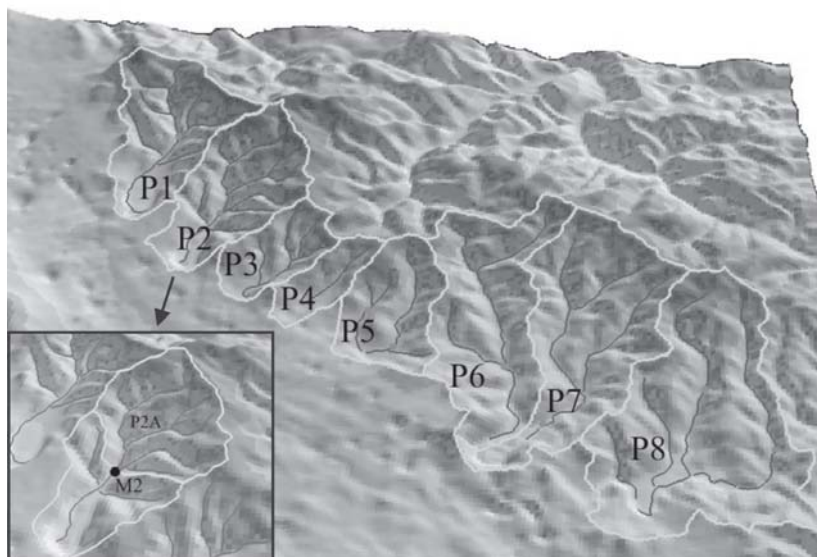
Slika 1. Obravnvano območje.

Figure 1. Study area.

Tabela 1. Osnovne reliefne značilnosti povodij.

Table 1. Basic relief characteristics of the catchments.

Oznaka povodja	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Površina [km ²]	6,52	5,90	2,28	1,46	3,33	6,84	7,88	10,18
Naklon								
Povprečni [°]	13,3	14,5	10,9	11,1	11,4	12,1	12,3	10,5
Standardni odklon [°]	6,5	6,6	4,6	4,8	5,2	5,4	5,5	5,0
Nadmorska višina								
Povprečna [m]	632	632	632	618	604	604	612	582
Minimalna [m]	497	475	547	543	524	501	499	492
Maksimalna [m]	811	808	745	741	747	760	763	764
Standardni odklon [m]	78	81	49	52	53	58	63	57



Slika 2. Digitalni model višin z območji povodij in mestom meritve M2.

Figure 2. Digital elevation model with catchments and measurement location M2.

bistveno razlikuje od pretežno karbonatnega dela zaledja. Večina vode odteče z območja Brkinov površinsko in podpovršinsko, z značilnim hitrim povečanjem odtokov po deževju. Skupna značilnost potokov je, da pritekajo iz slabo prepustnih flišnih kamnin

in ponikajo na delu povodja, kjer je matična podlaga apnenec. Dno dolin na tem delu je pokrito z aluvialnimi sedimenti. Potoki se večinoma končajo s ponori. Voda potokov jih doseže le ob visokem vodostaju, drugače ponikne že v strugi.

Osnovne reliefne značilnosti povodij, ki so bile izdelane z analizo digitalnega modela višin - DMV (ZRC SAZU & Mobitel, d. d., 2000), so prikazane v tabeli 1. Zaradi različnih poimenovanj potokov na obravnavanem območju so povodja označena z oznakami od P1 do P8 (od severozahoda do jugovzhoda). Natančneje je te slepe doline morfološko analiziral MIHEVC (1991).

HIDROLOŠKI MODEL OBRAVNAVANEGA OBMOČJA

Uporabljeni podatki

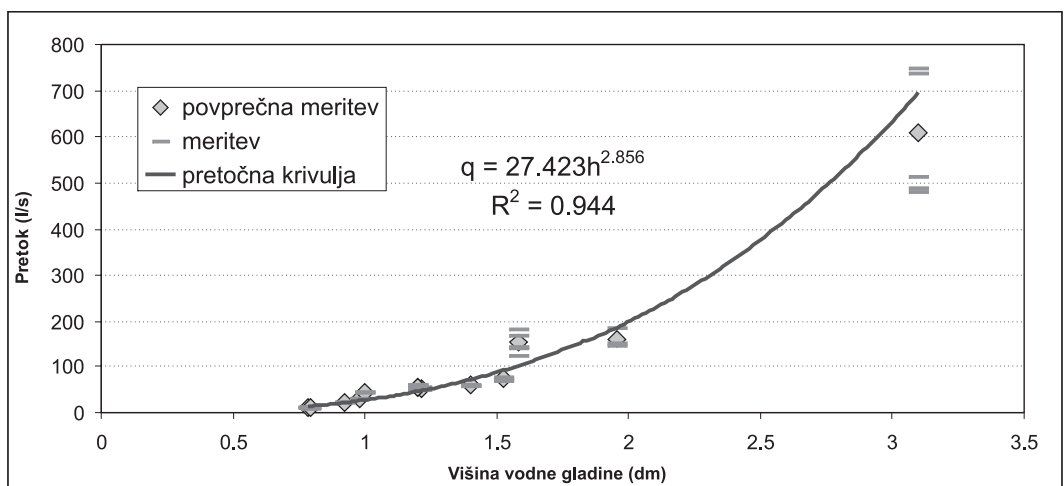
Izdelava modela je zahtevala številne vhodne podatke. V nadaljevanju so na kratko opisani najpomembnejši med njimi. Natančneje je uporabljene podatke opisal JANŽA (2003).

Meritve pretokov

Za namene modeliranja so bile opravljene meritve pretokov na izbranih mestih potokov. Meritve so bile občasne, razen na merskem

mestu M2, kjer je bil nameščen sistem za zvezno meritev pretoka (sl. 2). Za zvezno meritev pretoka je bilo izbrano mesto, ki po svojih značilnostih odražala lastnosti vseh povodij. Meritev je bila opravljena v umetnem kanalu, ki služi kot prepust potoka pod gozdno cesto. S tem se je izognilo vplivu spremembe merskega preseka, kar je pogosto težava pri meritvah pretoka v naravnih koritih. S konstrukcijo ob straneh kanala je bil zmanjšan njegov presek na iztoku in preoblikovan v trapezoidno obliko, ki omogoča natančnejšo meritev nizkih pretokov. Pretok je bil ocenjen posredno preko nivoja vode v kanalu, ki je bil merjen v petnajstminutnih intervalih s tlačno sondo z natančnostjo 6,2 mm. Sonda je bila postavljena na dno kanala. Privzeto je bilo, da pretoka ni, ko se gladina vode v kanalu zniža do nivoja sonde.

Za določitev odnosa med pretokom in višino vode so bile uporabljene meritve pretoka s kemijsko integracijsko metodo in takrat izmerjeni nivoji. Na podlagi teh podatkov je



Slika 3. Pretočna krivulja.

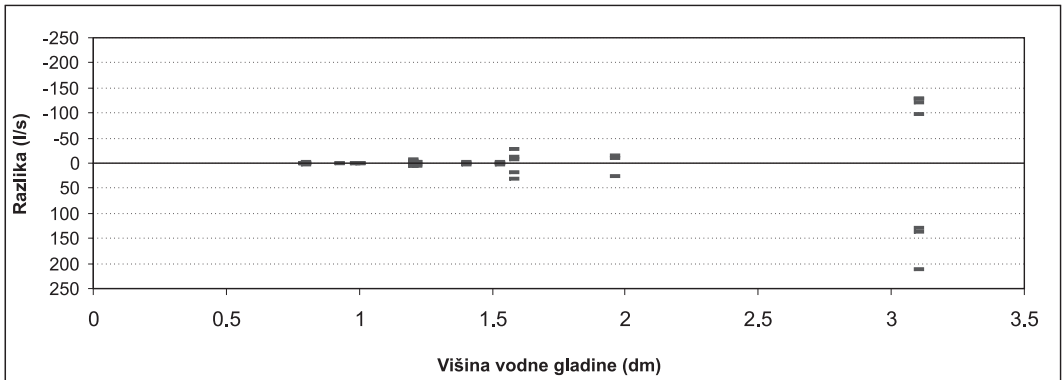
Figure 3. Rating curve.

bila določena pretočna krivulja (sl. 3), ki ima obliko funkcije: $q = gh^u$, kjer so: (1)

q pretok;
 h višina gladine vode v kanalu;
 g, u umeritvena koeficienta.

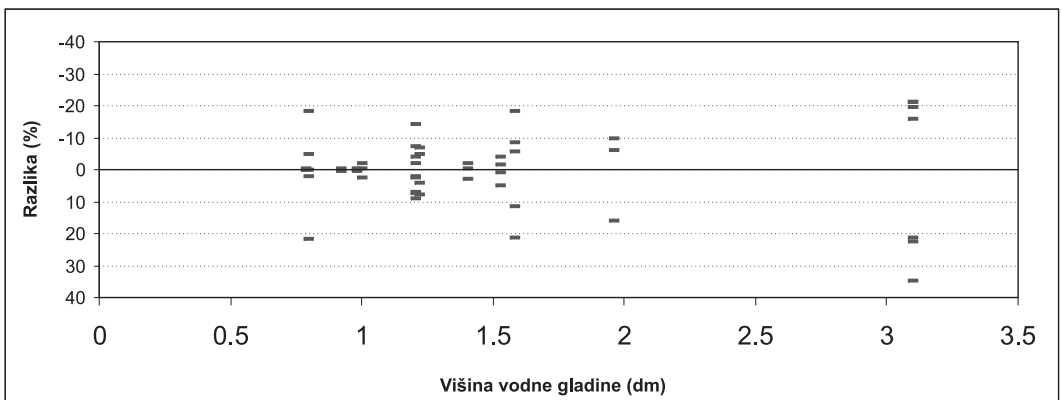
Natančnost meritev, uporabljenih za določitev pretočne krivulje je prikazana na slikah 4 in 5, ki prikazujeta absolutno in relativno razliko med posameznimi meritvami in njihovim povprečjem. Na sliki 6 so prikazane razlike med modelom pretočne krivulje in povprečji merjenih pretokov.

Ustreznost uporabljenega modela pretočne krivulje je bila preverjena z analizo variance, ki temelji na razmerju med eksperimentalno napako posameznih meritev in odstopanjem modela pretočne krivulje od povprečnih meritev v posameznih točkah. V obravnavanem primeru znaša povprečni kvadrat čiste napake $MS_{PE} = 3707 \text{ l}^2/\text{s}^2$, povprečni kvadrat napake prilagajanja pa $MS_{LOF} = 5740 \text{ l}^2/\text{s}^2$. Razmerje $F^{izr.} = MS_{LOF}/MS_{PE}$ znaša 1,55, kar je manj kot tabelarična kritična vrednost porazdelitve $F_{(a,k-p,N-k)} = 2,0$ ($k = 13$ - število točk na katere je bil model prilagojen,



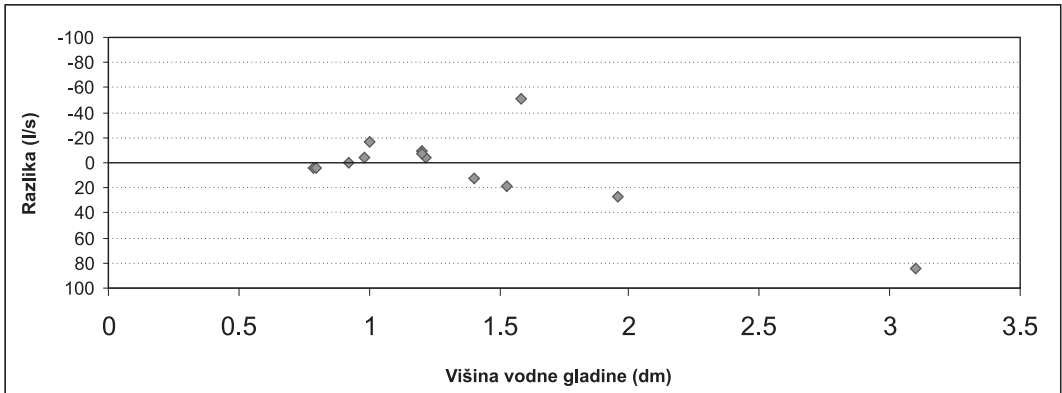
Slika 4. Razlika med posameznimi meritvami pretokov in njihovim povprečjem.

Figure 4. Difference between measured discharges and their averages.



Slika 5. Relativna razlika med posameznimi meritvami pretokov in njihovim povprečjem.

Figure 5. Relative difference between measured discharges and their averages.



Slika 6. Razlika med modelom pretočne krivulje in povprečji merjenih pretokov.

Figure 6. Difference between the rating curve model and average discharges.

$p = 1 - \text{število parametrov modela,}$
 $N = 51 - \text{število vseh meritev}$) za mejo zanesljivosti $\alpha = 0,05$. Z zadostitvijo pogoja: $1 < F^{\text{izr}} < F_{(0,05,12,38)}$ je bila potrjena ustreznost modela pretočne krivulje.

Z opisanim modelom pretočne krivulje izračunani povprečni dnevni pretoki na merskem mestu M2 so prikazani na sliki 8. Zaradi tehničnih razlogov in občasno zamrznjene struge potoka meritve niso zvezne za celotno obdobje od 1. 11. 2001 do 31. 3. 2003. Okrog 20 % obravnavanega obdobja je brez podatkov. Za obdobja razpoložljivih podatkov znaša ocenjena mediana dnevnih pretokov 25 l/s.

Meritve naravnih vodotokov so podvržene številnim napakam. V opisanem primeru jih je težko ovrednotiti, so pa predvsem posledica poenostavljene izvedbe merskega mesta in omejenega števila neposrednih meritev. Zaradi manjšega števila meritev za stanja visokih vod in manjše natančnosti teh meritev (sl. 4) je zanesljivost izračuna visokih pretokov s pomočjo izdelane pretočne krivulje manjša.

Meteorološki podatki

Modeliranje je bilo izvedeno za dve obdobji. V vsakem obdobju so bili uporabljeni podatki takrat delujočih meteoroloških postaj, ki so bile najbližje obravnavanemu območju. Za prvo obdobje modeliranja (od 1. 1. 1983 do 31. 12. 1993) so bile uporabljene dnevne višine padavin iz padavinskih postaj Matavun, Kozina in Podgrad ter višine potencialne evapotranspiracije iz meteorološke postaje Ilirska Bistrica. V drugem obdobju modeliranja (od 1. 11. 2001 do 31. 3. 2003) so bile uporabljene višine padavin iz padavinskih postaj Kozina in Podgrad ter višine potencialne evapotranspiracije iz meteorološke postaje Godnje.

Za prostorsko porazdelitev padavin je bila uporabljena korigirana Thiessenova metoda (JANŽA, 2003). Vrednosti višin potencialne evapotranspiracije so bile uporabljene brez porazdelitve – enotne vrednosti na celotnem obravnavanem območju.

Digitalni model višin

Za izdelavo modela površja obravnavanega območja je bil uporabljen digitalni model višin - DMV (ZRC SAZU & Mobitel, d. d., 2000). Velikost celic DMV je 25 m, povprečna višinska natančnost okoli 2 m za ravninska območja, za zmerno razgiban relief okoli 5 m in za hribovit relief okoli 10 m (OŠTIR, 2000). Za potrebe modeliranja je bila spremenjena velikost celic DMV, tako da ustrezajo ostalim vhodnim prostorskim podatkom. V ta namen je bila uporabljena bilinearna interpolacija.

Pedološki podatki

Podatki za modeliranje nezasičene cone temeljijo na pedološki karti v merilu 1 : 25000 in izbranih pedoloških profilov (CPVO, 2001). Pedološka karta je poligonski informacijski sloj, sestavljen iz pedokartografskih enot (PKE), ki so osnovne kartografske enote. Posamezna PKE je sestavljena iz ene ali več pedosistemskih enot, ki v naravi značilno nastopajo skupaj in jih zaradi merila karte ni mogoče prikazati ločeno. Poligoni PKE se med seboj razlikujejo po zastopanih pedosistemskih enotah (tipih tal) in njihovem medsebojnem razmerju (VRŠČAJ & TIČ, 1998).

Na obravnavanem območju so bile, glede na vrsto in zastopanost pedosistemskih enot v posamezni PKE, le-te združene v sedem pedoloških enot, ki so uporabljene v modelu. Hidravlične lastnosti teh enot so bile opredeljene na podlagi tipičnih pedoloških profilov (za posamezno enoto), izbranih v širši okolici obravnavanega območja. Posamezni pedološki profil je sestavljen iz različnih horizontov, ki imajo teksturne podatke (delež peska, melja in gline). Z uporabo pedotransfer funkcij so bile na

podlagi teh podatkov ocenjene hidravlične lastnosti pedoloških enot, ki so uporabljene v modelu.

Vegetacijski podatki

Porazdelitev vegetacijskih razredov oziroma raba tal v modelu je bila določena s klasifikacijo satelitske podobe LANDSAT-5 TM (JANŽA, 2005). Lastnosti posameznih vegetacijskih razredov so bile opredeljene s predhodno določenimi (modeliranimi) vrednostmi vegetacijskih parametrov (KRISTENSEN ET AL., 2000).

Hidrološki model MIKE SHE

MIKE SHE je programski paket za modeliranje celotnega hidrološkega kroga (ABBOT ET AL., 1986; REFGAARD & STORM, 1995). Je integriran sistem komponent ali modulov, ki omogoča modeliranje posameznih procesov hidrološkega kroga. Kompleksnost naravnega sistema oziroma njegovo konceptualno razumevanje in zahtevana zanesljivost modela pogojujeta uporabo (vključitev) različnih komponent. Hidrološki procesi so opisani z diferencialnimi enačbami, ki jih program rešuje numerično z uporabo metode končnih razlik. Ena od komponent modela MIKE SHE je MIKE 11, ki omogoča modeliranje hidrodinamičnih procesov površinskih voda. Uporablja se lahko kot samostojni model (reke, potoka, jezera) ali združen z modelom MIKE SHE, kar omogoča modeliranje celotnega hidrološkega kroga na obravnavanem območju.

Teoretične osnove modeliranja hidroloških procesov so natančneje opisane v DHI (2000a; 200b) in JANŽA (2003). V

nadaljevanju so podane enačbe modela za opis dinamike podzemne vode, ki je najpomembnejši del modela na obravnavanem območju. Parametri modela zasičene cone so najboljčutljivejši v modelu, zato je bila kalibracija omejena na te parametre.

V modelu opisuje trodimenzionalni tok podzemne vode v zasičeni coni enačba:

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

kjer so:

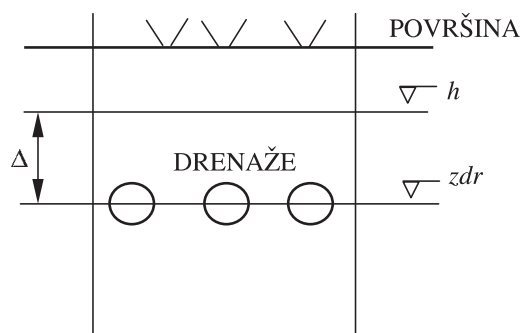
K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} koeficienti prepustnosti vzdolž koordinatnih osi [m/s];

h piezometrični nivo [m];

Q_e volumski pretok na enotski volumen (dotok/iztok) [s^{-1}];

S_s specifični koeficient elastičnega uskladiščenja [m^{-1}].

Model omogoča tudi simulacijo drenažnega toka v zasičeni coni. Ta se pojavi, ko je nivo podzemne vode nad nivojem drenaže (sl. 7). Odtok je odvisen od razlike med nivojema (Δ) in časovne konstante (cdr_n), ki določa



Slika 7. Shematski prikaz koncepta drenaž v modelu (po DHI, 2000a).

Figure 7. Schematic presentation of drains in the model (after DHI, 2000a).

gostoto drenaž. Drenažni odtok je modeliran kot linearen rezervoar z izrazom:

$$q = (h_n - zdr_n) cdr_n \quad (3)$$

kjer so:

q drenažni odtok [m^3]

h_n nivo podzemne vode (v n celici) [m];

zdr_n nivo drenaž [m];

cdr_n drenažna časovna konstanta [s^{-1}].

Zasnova in parametrizacija modela na obravnavanem območju

Model na območju Brkinov je zasnovan na povodju P2A - delu povodja P2, ki leži vzvodno od merske točke M2, kjer so bile opravljene zvezne meritve pretoka (sl. 2). Enak pristop je bil uporabljen za kalibracijske parametre. Njihove vrednosti so bile določene v fazi kalibracije na povodju P2A in nato uporabljene na celotnem območju modela. Kalibracija modela je bila opravljena na podlagi vizualne primerjave merjenega (s pretočno krivuljo izračunanega) in modeliranih hidrografov. Najpomembnejša razloga za uporabo enotnega koncepta na vseh povodjih sta:

- povodja imajo podobne (hidrogeološke, topografske, vegetacijske) značilnosti;
- pomanjkanje ustreznih merskih podatkov na ostalih povodjih, ki bi omogočili kalibracijo vsakega povodja posamezno.

Modeliranje je bilo izvedeno za dve ločeni obdobji:

- prvo obdobje modeliranja, od 1. 1. 1983 do 31. 12. 1993;
- drugo obdobje modeliranja, od 1. 11. 2001 do 31. 3. 2003.

Postopek modeliranja je bil razdeljen na več faz:

1. Modeliranje pretoka na merskem mestu M2 – odtoka iz povodja P2A. Ta model je bil izdelan za obdobje izvedenih meritev pretokov (od 1. 11. 2001 do 31. 3. 2003).
2. Vrednosti parametrov, ki so bile določene v procesu kalibracije tega modela, so bile nato uporabljene pri izdelavi modela za vsa povodja potokov na celotnem obravnavanem območju.
3. Ta skupni model povodij je bil nato uporabljen za modeliranje količine ponikajočih vod potokov v obdobju med 1983 in 1993, ki ustreza obdobju, uporabljenem v modelu vodonosnika v zaledju izvira Rižane (JANŽA, 2003).

Za potoke na območju Brkinov je značilno hitro povečanje pretokov po deževju. Večina vode odteče površinsko in podpovršinsko. Ta tokova sta v modelu simulirana z uporabo funkcije drenaž. Nivo drenaž je bil postavljen 0,5 m pod površino. Predpostavljeno je bilo, da je to globina manjših kanalov, ki delujejo kot drenažni sistem in niso ustrezno opisani z uporabljenim DMV (zaradi njegove premajhne natančnosti). Model deluje tako, da v primeru, ko podzemna voda v računski celici naraste nad nivo drenaž, odvede presežek vode do sosednje celice z nižjim nivojem. Postopek se nadaljuje, dokler ni dosežen vodotok. V manjšem delu povodij (predvsem njihovem nižjem delu), kjer se pojavljajo lokalne depresije, je bila uporabljena funkcija drenaže, ki ne upošteva naklona drenažnega nivoja in odvaja drenirano vodo neposredno do najbližjega vodotoka. Dinamika odvajanja vode je definirana s časovno konstanto, ki je bila določena v fazi kalibracije in ima v modelu vrednost $6 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$.

Tako odvedena (drenirana) voda tvori skupaj z osnovnim (baznim) tokom, ki je modeliran kot medzrnski tok v zasičenem delu računske (geološke) plasti, vhodne podatke za model odtoka po strugi potokov.

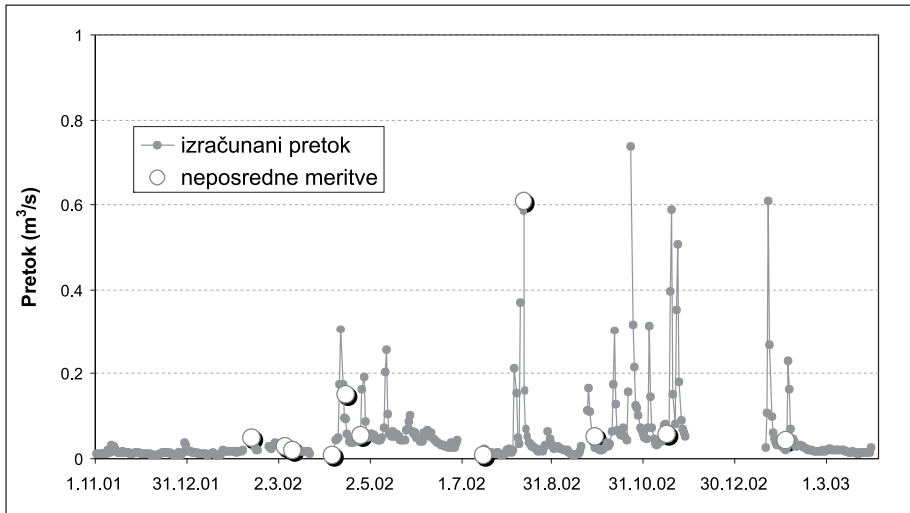
Območje Brkinov je sestavljeno iz slabo prepustnih flišnih plasti, zato so hidrološki procesi, ki vplivajo na odtok z območja omejeni na zgornji del teh plasti. V modelu so njihove lastnosti opredeljene z eno računsko plastjo, ki ustreza geološki plasti debeline 5 m. S kalibracijo določena vrednost koeficienta prepustnosti plasti v horizontalni smeri je 10^{-7} m/s , v vertikalni pa 10^{-8} m/s . Spodnji meji plasti je pripisana zelo nizka vertikalna prepustnost (10^{-9} m/s) in deluje praktično kot neprepustna plast. Horizontalna velikost računske celice modela je $90 \times 90 \text{ m}$.

Odtok po strugi potokov je modeliran s programskim orodjem MIKE 11, ki je integrirano z modelom MIKE SHE. Položaj strug potokov v modelu (sl. 2) je določen z digitalizacijo rečne mreže topografske osnove 1 : 5000 (Geodetska uprava RS). Korita potokov so definirana poenostavljeno s trikotnimi preseki. Na začetku potokov (v najvišjem delu) je nastavljen robni pogoj ni dotokov. Za modeliranje toka v koritih je uporabljena metoda enostavnega hidravličnega izračuna (ang. kinematic routing), kjer temelji postopek izračuna hidrografa v določeni točki na dotoku in hidrografih vzvodno ležečih pritokov (DHI, 2000b). Prednost metode je stabilnost in nezahtevnost glede vhodnih parametrov, ki v obravnavanem primeru niso bili na razpolago.

REZULTATI IN RAZPRAVA

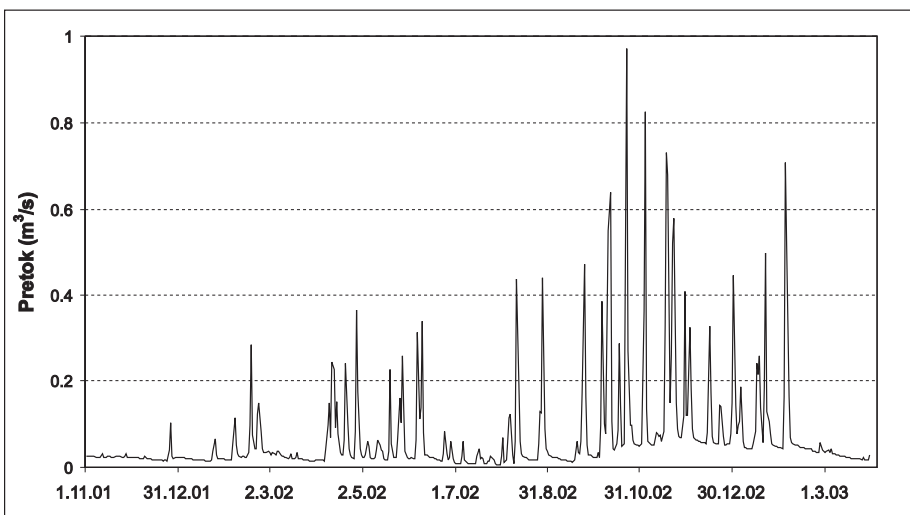
Povprečni simulirani dnevni pretok za celotno drugo obdobje modeliranja (1. 11. 2001 do 31. 3. 2003) na merskem mestu M2

znaša 71 l/s (P50 = 29 l/s). Grafična primerjava modeliranih povprečnih dnevni pretokov na merilnem mestu M2 (sl. 9) z neposrednimi in z modelom pretočne krivulje izračunanimi zveznimi meritvami pretoka



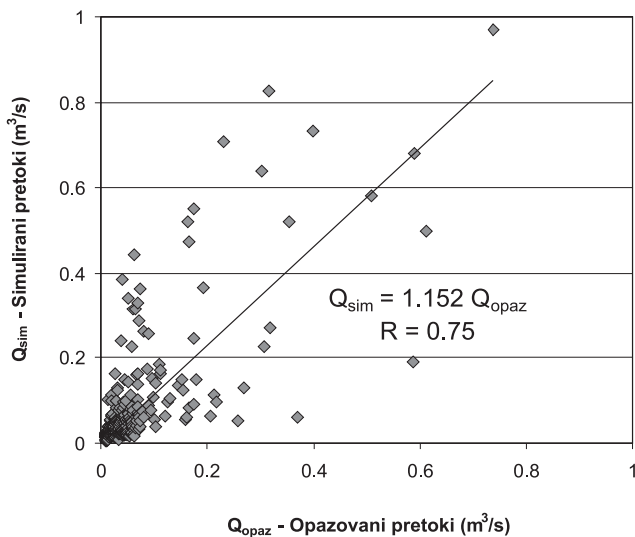
Slika 8. Neposredne meritve pretoka in izračunani povprečni dnevni pretoki (s pretočno krivuljo) na merskem mestu M2 (od 1. 11. 2001 do 31. 3. 2003).

Figure 8. Direct discharge measurements and calculated average daily discharges (with rating curve) on measurement location M2 (from 1. 11. 2001 to 31. 3. 2003).



Slika 9. Simulirani povprečni dnevni pretoki na merskem mestu M2 (od 1. 11. 2001 do 31. 3. 2003).

Figure 9. Simulated average daily discharges on measurement location M2 (from 1. 11. 2001 to 31. 3. 2003).



Slika 10. Korelacija med opazovanimi in simulirani povprečni dnevni pretoki na merskem mestu M2 (od 1. 11. 2001 do 31. 3. 2003).

Figure 10. Correlation between observed and simulated average daily discharges on measurement location M2 (from 1. 11. 2001 to 31. 3. 2003).

(sl. 8) kaže zmožnost modeliranja nizkih pretokov, kakor tudi dinamiko povečanja in upadanja pretoka. Vendar pa se določeni pretoki (vrhovi) hidrografov ne ujemajo. To odstopanje bi se lahko pripisalo predvsem vhodnim padavinskim podatkom, ki so najpomembnejša vhodna spremenljivka v modelu. Relativno majhno območje povodja P2A (3,6 km²) je podvrženo lokalnim vremenskim razmeram, ki se težko opišejo z oddaljenimi padavinskimi postajami.

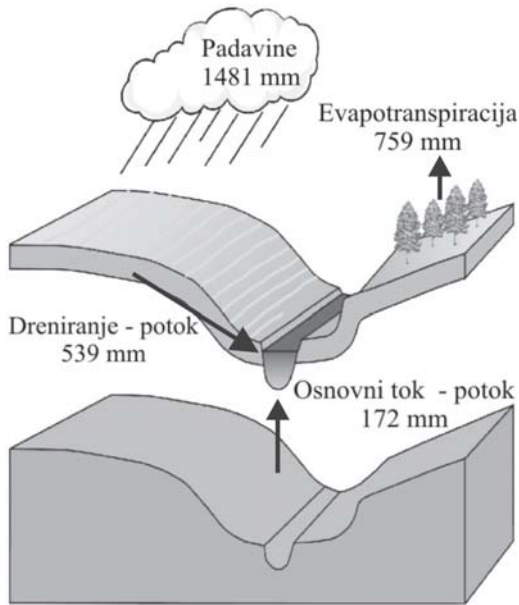
Korelacija med simuliranimi in opazovanimi (merjenimi) pretoki na merskem mestu M2 je prikazana na sliki 10. Smerni koeficient za linearno odvisnost pri kateri nastopa simulirani pretok kot odvisna, opazovani pretok pa kot neodvisna spremenljivka znaša 1,152, koeficient korelacije med primerjanima pretokoma pa 0,75.

Glavne bilančne komponente modela vseh povodij za enoletno obdobje (od 30. 3. 2002

do 30. 3. 2003) so prikazane na sliki 11. V modelu je polovica padavinske vode prenesena nazaj v ozračje kot posledica evapotranspiracije. Preostala voda iz povodij odteče do potokov predvsem v obliki površinskega in podpovršinskega hitrega odtoka, ki je v modelu simuliran s funkcijo drenaž. Približno trikrat manjši je počasen osnovni – bazni odtok.

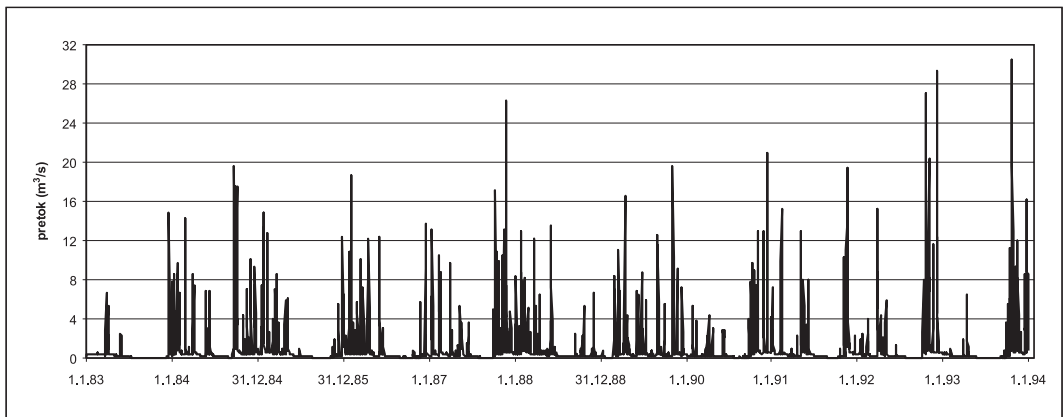
Hidrograf simuliranih skupnih odtokov s celotnega območja modela za prvo obdobje modeliranja in statistike odtokov po povodjih in skupno so prikazane na sliki 12 ter v tabelah 2 in 3.

Krivulja trajanja simuliranih povprečnih dnevni skupni odtokov iz vseh povodij v prvem obdobju modeliranja je prikazana na sliki 13. Celoten razpon pretokov je bil razdeljen na trideset enakih intervalov. Iz grafa je razvidno, da močno prevladujejo nizki odtoki. Le okrog 15 % simuliranih



Slika 11. Glavne bilančne komponente modela vseh povodij (skupno) za obdobje od 30. 3. 2002 do 30. 3. 2003 (1mm ustreza 1,4 l/s).

Figure 11. Main water balance components of the model of all catchments for the period from 30. 3. 2002 to 30. 3. 2003 (1mm corresponds to 1.4 l/s).



Slika 12. Hidrograf simuliranih skupnih odtokov s celotnega območja modela (od 1. 1. 1983 do 31. 12. 1993).

Figure 12. Hydrograph of simulated average daily total outflows from all catchments (from 1. 1. 1983 to 31. 12. 1993).

dnevni odtokov preseže $1 \text{ m}^3/\text{s}$, okrog 5 % odtokov $5 \text{ m}^3/\text{s}$, 1,5 % odtokov $10 \text{ m}^3/\text{s}$ in manj kot 0,5 % odtokov $15 \text{ m}^3/\text{s}$. Slika 14 prikazuje natančneje frekvenčno porazdelitev odtokov do $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Iz grafa je

razvidno, da najnižja razreda (do $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ in $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$) skupno tvorita skoraj 40 % simuliranih dnevni odtokov. Frekvenca višjih pretokov enakomerno upada do vrednosti $1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabela 2. Statistike simuliranih povprečnih dnevni odtokov iz posameznih povodij (od 1. 1. 1983 do 31. 12. 1993).

Table 2. Statistics of simulated average daily outflows from single catchments (from 1. 1. 1983 to 31. 12. 1993).

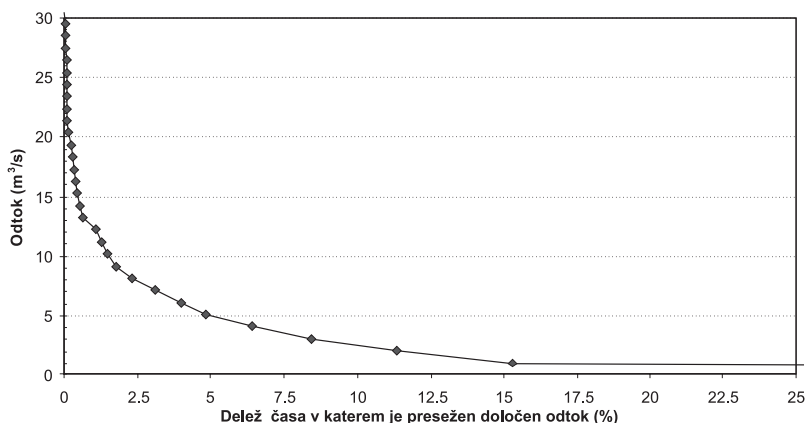
Oznaka povodja	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
\bar{Q} [m ³ /s]	0,134	0,132	0,052	0,036	0,076	0,148	0,176	0,215
s [m ³ /s]	0,282	0,270	0,115	0,103	0,174	0,397	0,485	0,549
Q_{\min} [m ³ /s]	0,002	0,002	0,001	0,000	0,002	0,001	0,001	0,003
Q_{\max} [m ³ /s]	3,989	3,700	1,515	1,331	2,255	5,184	6,333	7,119
P50 [m ³ /s]	0,050	0,053	0,020	0,006	0,027	0,035	0,036	0,057
P25 [m ³ /s]	0,022	0,023	0,008	0,002	0,018	0,015	0,014	0,025
P75 [m ³ /s]	0,091	0,099	0,037	0,013	0,042	0,066	0,070	0,105
$\sqrt{b_1}$	4,954	5,114	5,250	5,440	5,363	5,415	5,368	5,337
b_2	34,597	36,949	37,526	39,506	38,341	39,082	38,221	37,930

\bar{Q} – povprečni odtok, s – standardni odklon, Q_{\min} – minimalni odtok, Q_{\max} – maksimalni odtok, P50 – mediana, P25 – petindvajseti percentil, P75 – petinsedemdeseti percentil, $\sqrt{b_1}$ – cenilka asimetričnosti, b_2 – cenilka sploščenosti.

Tabela 3. Statistike simuliranih povprečnih dnevni skupni odtokov iz vseh povodij (simuliranih od 1. 1. 1983 do 31. 12. 1993).

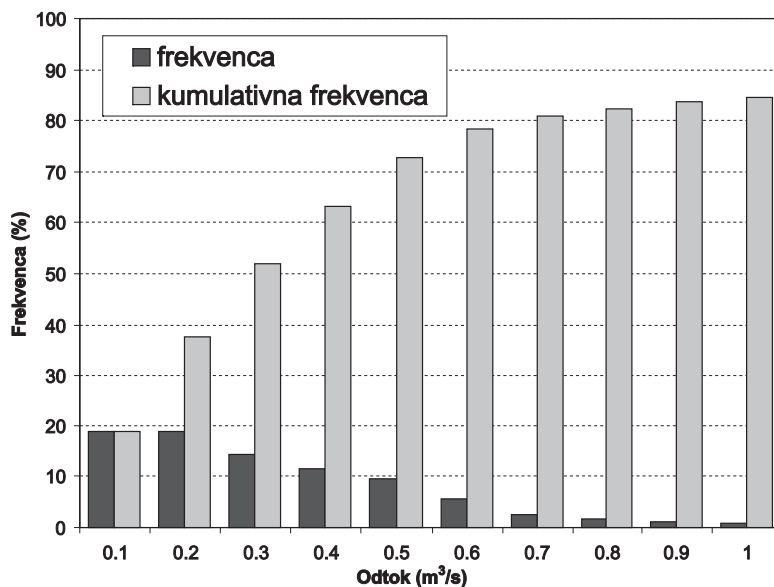
Table 3. Statistics of simulated average daily total outflows from all catchments (from 1. 1. 1983 to 31. 12. 1993).

\bar{Q} [m ³ /s]	s [m ³ /s]	Q_{\min} [m ³ /s]	Q_{\max} [m ³ /s]	P50 [m ³ /s]	P25 [m ³ /s]	P75 [m ³ /s]	$\sqrt{b_1}$	b_2
0,970	2,327	0,012	30,534	0,288	0,129	0,531	5,230	36,943



Slika 13. Krivulja trajanja simuliranih povprečnih dnevni skupni odtokov iz vseh povodij (od 1. 1. 1983 do 31. 12. 1993).

Figure 13. Flow duration curve of simulated average daily total outflows from all catchments (from 1. 1. 1983 to 31. 12. 1993).



Slika 14. Frekvenčna porazdelitev simuliranih povprečnih dnevni skupni odtokov iz vseh povodij do 1 m³/s (simuliranih od 1. 1. 1983 do 31. 12. 1993).

Figure 14. Frequency distribution of simulated average daily total outflows from all catchments up to 1 m³/s (from 1. 1. 1983 to 31. 12. 1993).

SKLEPI

Izdelani dinamični matematični model z distribuiranimi parametri omogoča modeliranje hidrološkega kroga na obravnavanem območju Brkinov - severovzhodnem delu varovanega zaledja izvira Rižane. Z modelom in izvedenimi meritvami pretokov so pridobljene nove informacije o vodni bilanci obravnavanega območja in posrednem napajanju vodonosnika v zaledju izvira Rižane. Novost je predvsem vključitev prostorske in dinamične komponente procesov, ki vplivajo na napajanje vodonosnika, kar bo prispevalo k boljšemu razumevanju celotnega vodonosnega sistema v zaledju izvira Rižane.

Z modelom simulirani odtoki z obravnavanega območja kažejo na izrazito hudourniško naravo potokov, ki drenirajo obrav-

navano območje. Povečanja odtoka so zelo hitra in pogojena z obilnejšim deževjem. Trajanje visokih odtokov je relativno kratko. V simuliranem enajstletnem obdobju (od 1. 1. 1983 do 31. 12. 1993) je le okrog 15 % simuliranih skupni povprečnih dnevni odtokov iz vseh povodij višjih od 1 m³/s, okrog 40 % odtokov pa je nižjih od 0,2 m³/s. Povprečni simulirani odtok za navedeno obdobje znaša 0,97 m³/s, mediana odtokov pa 0,288 m³/s.

Negotovost rezultatov modela je pogojena z več dejavniki. Eden pomembnejših je povezan z vhodnimi padavinski podatki, ki so najpomembnejša vhodna spremenljivka modela. Relativno majhno območje zasnove modela P2A (3,6 km²) je del reliefno razgibanega območja in je podvrženo lokalnim vremenskim razmeram, ki jih je težko opisati z oddaljenimi padavinskimi

postajami. Prav tako pomemben razlog negotovosti v modelu je natančnost meritev, uporabljenih za izdelavo modela pretočne krivulje. Zaradi omejenega števila meritev visokih pretokov je izračun le-teh z umeritveno krivuljo (še posebej pa ekstrapolacija izven območja meritev) lahko pomemben vir napake. Nепreverjeni možni vir napake ostaja zasnova modela, ki je bila izdelana na povodju P2A in uporabljena na ostalih povodjih obravnavanega območja. Za potrditev uporabljenega pristopa in predpostavke o podobnih lastnostih zaledij bi bila potrebna izvedba dodatnih zveznih meritev pretokov na ostalih povodjih.

SUMMARY

Modelling the recharge of the aquifer in the Rižana catchment from Brkini area

In the paper a dynamic distributed hydrological model (MIKE SHE-MIKE 11) that was developed in the area of Brkini is described. The model area is a part of the

recharge area of the aquifer of Rižana spring. With the model new information regarding water balance of the area and indirect recharge of the aquifer is obtained. Of great importance is the temporal variability of the aquifer recharge, which will contribute to the better understanding of the processes in the aquifer system and which will help to more efficiently manage this important water resource. Characteristics of the outflow, defined on the daily simulated outflows for eleven years period (from 1. 1. 1983 to 31. 12. 1993), are described with statistics: average outflow 0.970 m³/s, standard deviation 2.327 m³/s, minimum outflow 0.012 m³/s, maximum outflow 30.534 m³/s, median 0.288 m³/s, 25 percentile 0.129 m³/s, 75 percentile 0.531 m³/s, skewness 5.230 and kurtosis 36.943. Frequency distribution of the simulated average daily total outflows from the model area (with the interval step size 0.1 m³/s) shows the domination of low outflows. Almost 40 % of simulated outflows are lower than 0.2 m³/s. Frequency of higher outflows gradually decreases to 1 m³/s. Higher than 1 m³/s is only about 15 % of outflows.

VIRI

- ABBOT, M. B., BATHURST, J. C., CUNGE, J. A., O'CONNELL, P. E., RASMUSSEN, J. (1986): An Introduction to the European Hydrological System-Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 2: structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*; Vol. 87, pp. 61–77.
- CPVO (2001): Digitalna pedološka karta 1 : 25000 [za obravnavano območje].: Center za pedologijo in varstvo okolja, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani, Ljubljana.
- DHI. (2000a): MIKE SHE WM – User Manual, Edition 1.2., DHI Water & Environment, Horsholm.
- DHI (2000b): MIKE 11 A Modelling System for Rivers and Channels – Reference manual, DHI Water & Environment, Horsholm, 335 p.
- JANŽA, M. (2003): Modeliranje napajanja regionalnega vodonosnika z uporabo metod daljinskega zaznavanja: doktorska disertacija. Univerza v Ljubljani, NTF, Ljubljana, 139 p.
- JANŽA, M. (2005): Določitev rabe tal s klasifikacijo satelitske podobe za namene hidrološkega modeliranja na območju zaledja izvira Rižane. *Geologija*; Vol. 48/1, v tisku.
- KRISTENSEN, M., ANDERSSON, U., SØRENSEN, H. R., REFSGAARD, A. (2000): Water Resources Management Model for Ljubljansko Polje and Ljubljansko Barje, Model report. DHI, Horsholm, 79 p.

- KRIVIC, P., BRICELJ, M., ZUPAN, M. (1989): Podzemne vodne zveze na področju Čičarije in osrednjega dela Istre. *Acta Carsologica*, Vol. 17, pp. 265–295.
- KRIVIC, P., BRICELJ, M., TRIŠIČ, N., ZUPAN, M. (1987): Sledenje podzemnih vod v zaledju izvira Rižane. *Acta Carsologica*; Vol. 16, pp. 83–104.
- MIHEVC, A. (1991): Morfološke značilnosti ponornega kontaktnega krasa: izbrani primeri s slovenskega krasa: *magistrsko delo. Univerza v Ljubljani*, Ljubljana, 206 p.
- NOVAK, D. (1963): Slovenski kras. A. Primorski kras. Hidrogeološko raziskovanje Primorskega krasa. *Geološki zavod Slovenije*, Ljubljana, 96 p.
- OŠTIR, K. (2000): Analiza vpliva združevanja radarskih interferogramov na natančnost modelov višin in premikov zemeljskega površja: *doktorska disertacija. Univerza v Ljubljani*, Ljubljana, 175 p.
- PRESTOR, J. (1992): Prispevek k preučevanju odnosov med padavinami in odtokom iz kraškega vodonosnika: *magistrsko delo. Univerza v Ljubljani*, NTF, Ljubljana, 44 p.
- REFSGAARD, J. C. & STORM, B. (1995): MIKE SHE. In: SINGH, V. P. (ed.). *Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications*; pp. 809–846.
- VRŠČAJ, B. & TIČ, I. (1998): Digitalni podatki tal Slovenije; Gradivo kot pomoč pri uporabi digitalnih pedoloških podatkov, verzija 1.0. Center za pedologijo in varstvo okolja, *Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani*, Ljubljana, 25 p.
- ZRC SAZU & Mobitel (2000): InSAR DMV 25 (Digitalni model višin). ZRC SAZU, Ljubljana.