

ACTA CARSOLOGICA	29/2	21	271-292	LJUBLJANA 2000
------------------	------	----	---------	----------------

COBISS: 1.01

**ZNAČILNOSTI ODNOSA MED NAPAJANJEM IN  
PRAZNJENJEM KRAŠKEGA VODONOSNIKA V ZALEDJU  
IZVIROV VIPAVE (SLOVENIJA)**

CHARACTERISTICS OF THE RECHARGE-DISCHARGE  
RELATION OF THE KARST AQUIFER IN THE BACKGROUND  
OF THE VIPAVA SPRINGS (SLOVENIA)

METKA PETRIČ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Titov trg 2, SI-6230 POSTOJNA, SLOVENIJA

Prejeto / received: 15. 8. 2000

**Izvleček**

UDK: 556.33(497.4)

**Metka Petrič: Značilnosti odnosa med napajanjem in praznjenjem kraškega vodonosnika v zaledju izvirov Vipave (Slovenija)**

V opravljeni raziskavi sem iskala odgovore na vprašnji, kakšne so značilnosti odnosa med napajanjem in praznjenjem kraškega vodonosnika v zaledju izvirov Vipave in kaj lahko na osnovi ugotovljenih odnosov med vhodnim in izhodnim signalom kraškega sistema sklepamo o zakonitostih njegovega delovanja. Postavila sem več različnih modelov napajanje-praznjenje. Za vsakega sem pretvorbo vhodnega signala v odziv sistema definirala s funkcijami transferja, ki v matematični obliki odražajo razmere in procese v kraškem sistemu. Primerjava ustreznosti različnih postavljenih modelov je potrdila pomemben vpliv vegetacije ter procesov v ozračju in tleh na količino vode, ki dejansko vstopi v kraški vodonosnik in sem jo izrazila s funkcijo napajanja. Točnost simulacije pa se je povečala tudi z razčlenitvijo napajanja na počasno in hitro komponento, kar se ujema z dvojnimi mehanizmom delovanja kraškega sistema: s hitrim pretokom skozi kraško drenažno mrežo in daljšim zadrževanjem v sistemu z uskladiščenjem v conah slabše prepustnosti.

**Ključne besede:** kraška hidrologija, napajanje, praznjenje, funkcije transferja, izviri Vipave, Slovenija.

**Abstract**

UDC: 556.33(497.4)

**Metka Petrič: Characteristics of the recharge-discharge relation of the karst aquifer in the background of the Vipava springs (Slovenia)**

In the presented research I tried to find answers to the following questions: what the characteristics of the relation between recharge and discharge of the karst aquifer in the background of the Vipava springs are and which conclusions about the functioning of the karst system can be made based on stated relations between its input and output signal. Several different models of the system recharge-discharge were set. For each the conversion of the input signal to the system response was defined by transfer functions, which express conditions and processes in the karst system in mathematical form. Based on the comparison of the suitability of these different models an important influence of vegetation and processes in atmosphere and soil on the quantity of water that actually enters the karst aquifer and is expressed as recharge function was proved. An increase in the accuracy of the simulation was obtained also by the temporal distribution of recharge in fast and slow component, which is in agreement with the double mechanism of the functioning of the system: fast flow through the karst drainage net and longer retardation in the system with storage of water in less permeable zones.

**Key words:** Karst hydrology, recharge, discharge, transfer functions, Vipava springs, Slovenia.

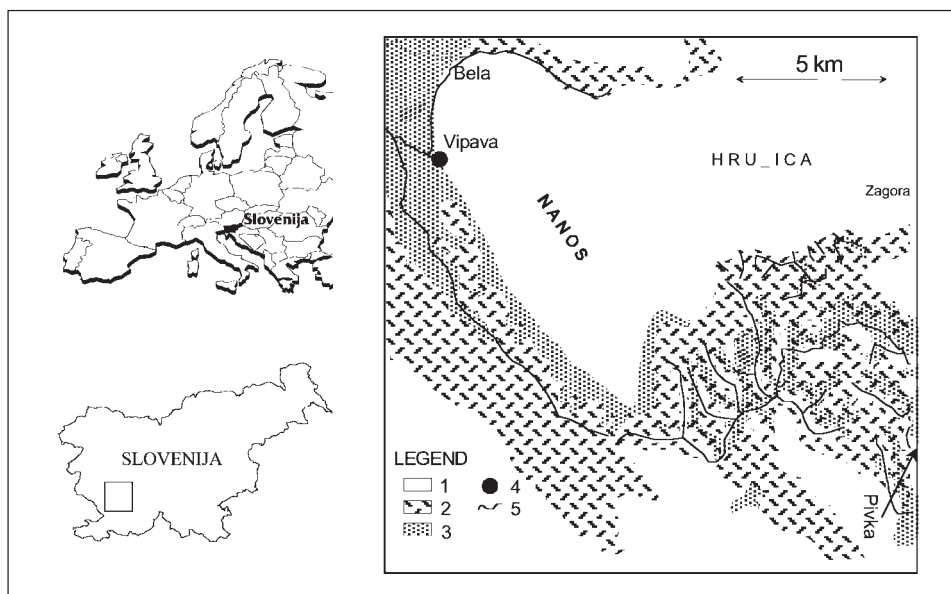
## UVOD

Kraški izviri Vipave so eden izmed najpomembnejših vodnih virov v jugozahodni Sloveniji. Zato so bile v preteklih letih v njihovem zaledju opravljene številne hidrogeološke raziskave, ki so pojasnile osnovne zakonitosti delovanja kraškega sistema, hkrati pa odprle nova vprašanja o njegovih hidrodinamičnih značilnostih. Merjenja širokega spektra hidrogeoloških parametrov so bila organizirana predvsem v okviru mednarodnega projekta »7. SWT - Širjenje škodljivih snovi v krasu; sledila in modeli v različnih vodonosnikih«. Na ta način je bila zbrana obsežna baza podatkov, ki pa je bila le deloma uporabljena v izbranih analizah in razne možnosti nadaljnje obdelave so ostale neizkoriščene. Ker so bili merjeni predvsem podatki o meteoroloških razmerah in značilnostih kraških izvirov, se je razvila zamisel o nadaljevanju raziskav s študijo, v kateri bi bila glavna pozornost posvečena podrobni analizi značilnosti odnosa med napajanjem in praznjenjem kraškega vodonosnika v zaledju izvirov Vipave. Študijo sem izdelala kot mlada raziskovalka v okviru programa Ministrstva za znanost in tehnologijo pod mentorstvom prof. dr. Mirana Veseliča, ki se mu na tem mestu še enkrat zahvaljujem za pomoč in strokovne nasvete. Hvala tudi Borisu Zupančiču z MOP - Hidrometeorološkega zavoda RS, ki mi je omogočil, da sem brez nadomestila dobila obsežno bazo meteoroloških podatkov.

## OSNOVNE ZNAČILNOSTI VODONOSNIKA

Zaradi specifičnih lastnosti kraškega vodonosnika (neznane poti podzemne vode, bifurkacija, spreminjanje obsega zaledja ob različnih hidroloških pogojih, skrit podzemni tok v pokritem krasu) natančna omejitev zaledja izvirov Vipave ni možna, ampak je potrebno pri določitvi meja upoštevati nekatere poenostavitve. Osrednji del zaledja obsega kraško območje Nanosa in Hrušice (Sl. 1), na osnovi znanih podatkov pa ni mogoče točno opredeliti položaja razvodnice med Vipavo in Ljubljano na območju Hrušice. S sledilnimi poizkusi je bilo dokazano, da se proti Vipavi stekajo ponikalnice s flišnega območja na severozahodnem obrobju Pivške kotline, kjer lahko mejo zaledja potegnemo po površinskih razvodnicah med Vipavo in Pivko (Habe 1970, Behrens et al. 1997). Na osnovi hidrokemičnih značilnosti in posredno tudi rezultatov sledilnih poizkusov lahko sklepamo na omejen in s hidrološkimi razmerami pogojen dotok iz površinskega toka Bele v izvire Vipave (Habič 1983, Behrens et al. 1997). S sledilnimi poizkusi pa so bile ugotovljene še podzemne vodne zveze z dolino Pivke, pa tudi s kraškim masivom Javornikov, ki se dviga nad dolino Pivke proti zahodu (Habič 1989, Kogovšek et al. 1999). Glavni tok s tega območja je sicer usmerjen proti izvirov na Planinskem polju, del podzemnih voda pa odteka tudi proti Vipavi. Zaradi vseh opisanih značilnosti sem pri določitvi obsega zaledja uporabila metodo vodne bilance. Na osnovi primerjave podatkov o srednjih vrednostih padavin, realne evapotranspiracije in odtokov v 30-letnem obdobju 1961-1990 sem površino zaledja ocenila na 149 km<sup>2</sup> (Petrič 2000). Od tega predstavlja 9 km<sup>2</sup> nekraški, 140 km<sup>2</sup> pa kraški del zaledja na območju Nanosa in Hrušice. Zaradi pomanjkanja ustreznih podatkov sem namreč privzela, da je zaradi podobnih značilnosti krasa Javornikov ter Nanosa in Hrušice napaka, ki sem jo naredila z neupoštevanjem območja Javornikov kot dela zaledja in s tem precenjenim obsegom zaledja na Hrušici, zanemarljiva.

Do nekaj več kot 1300 m visok, okrog 12 km dolg in 7 km širok kraški hrbet Nanosa se dviga z visokimi in strmimi stenami iz flišnega obrobja Vipavske doline in Pivške kotline. Na severoza-



Sl. 1: Hidrogeološka karta (1. kraški vodonosnik, 2. neprepustni fliš, 3. medzrnski vodonosnik, 4. kraški izvir, 5. površinski tok).

Fig. 1: Hydrogeological map (1. karst aquifer, 2. impermeable flysch, 3. porous aquifer, 4. karst spring, 5. surface stream).

hodni strani ga omejuje dolina Bele, proti severovzhodu pa prehaja v nižje površje Hrušice, ki se proti zahodu nadaljuje v Zagoro. Precej ravninsko je severozahodno obrobje Pivške kotline s številnimi ponikalnicami (Sl. 1).

Ob vznožju Nanosa prihaja podzemna voda na površje v več stalnih in občasnih izvirih. V centru mesta Vipave je na nadmorski višini 98 m na razdalji okrog 300 m razporejenih sedem stalnih izvirov. Od teh je izvir Pod lipco (V2) zajet za vodooskrbo Vipavske doline. Proti severu je na nadmorskih višinah do 125 m še šest občasnih izvirov.

Za izvire Vipave je značilen kraški hidrološki režim s kratkotrajnimi visokimi pretoki in daljšimi obdobji srednjih in nizkih vod. Ekstremni viški pretokov se pojavljajo hkrati z viški padavin. V obdobju 1961-90 sta bila po podatkih MOP - Hidrometeorološkega zavoda Republike Slovenije za stalne izvire Vipave izmerjena najmanjši pretok 727 l/s in največji 70 m<sup>3</sup>/s, srednji pretok v tem intervalu pa je bil 6,78 m<sup>3</sup>/s. Razmerje med nizkimi, srednjimi in visokimi vodami je torej okrog 1:10:100. Vipava ima največje pretoke v aprilu in novembru. Novembrski viški so predvsem rezultat obilnega jesenskega dežja, visoki pretoki v aprilu pa se pojavljajo tudi kot posledica taljenja snega. Najnižje vode so v juliju in avgustu.

Površinskih voda v kraškem delu zaledja ni, so pa številne ponikalnice na njegovem obrobju. V severozahodnem delu Pivške kotline potoki Lokva, Belščica, Ribnik, Mrzlenk ter vode v Stranskih in Šmihelskih ponikvah po krajšem površinskem toku na flišnem površju ponikajo v kraški vodonosnik. Tudi potok Bela verjetno izgublja del vode in napaja stalne izvire Vipave. Zanesljiva pa je

povezava Bele z občasnimi izviri Vipave, saj se ti stekajo v njeno strugo. V Pivški kotlini predstavlja glavno vodno žilo reka Pivka, ki je prav tako s podzemnimi vodnimi tokovi povezana z izviri Vipave.

Obravnavano območje je večinoma zgrajeno iz karbonatnih kamnin. Najstarejši so norijsko-retijski dolomiti na južnem obrobju Hrušice (Buser et al. 1967, Buser 1968). V vzhodnem delu Nanosa in na Hrušici so kot apnenci in deloma dolomiti z vsemi medsebojnimi prehodi razviti liasni, doggerski in malmski litostratigrafski členi. Prevladujejo pa v kraškem zaledju izvirov Vipave kredne kamnine. Na obrobju Pivške kotline, na Nanosu in Hrušici je spodnja kreda razvita kot apnec z vložki bituminoznega dolomita, sledijo pa zgornjekredni organogeni apnenci. Območje je močno zakraselo s številnimi površinskimi kraškimi oblikami in jamami, med katerimi prevladujejo brezna. Razvit je globoki kras. Karbonatni kredni razvoj se zaključuje z erozijsko diskordanco, nad katero ležijo eocenske flišne kamnine. Te gradijo območje Vipavske doline in Pivške kotline, izdanjajo pa tudi v dolini Bele. Razvite so kot laporovci in kremenovi peščenjaki z vložki kalkarenitov in kalkruditov ter predstavljajo neprepustno pregrado. Strma pobočja Nanosa nad Vipavsko dolino so prekrita s kvartarnimi brečami in nesprijetim pobočnim gruščem. Ob površinskih vodotokih pa so odloženi aluvialni sedimenti. Kvartarni sedimenti gradijo dobro prepustne medzrnske vodonosnike. Številni manjši izviri v grušču so zajeti za lokalno vodooskrbo.

Značilna je narivna zgradba, ki je presekana s številnimi neotektonskimi prelomi (Placer 1981). Osrednji del z Nanosom in Hrušico, pa tudi severovzhodni del Vipavske doline, pripada Hrušiške-mu pokrovu. Ta je narinjen na Snežniško narivno grudo, ki obsega Postojnski Ravnik, Pivško kotlino, Javornike in ozek pas fliša, ki se mimo južnega roba Nanosa vleče v Vipavsko dolino. Na stiku so na zahodnem obrobju Pivške kotline nastale še Bukovška, Debelovrška in Suhovrška vmesna luska. Območje v dinarski smeri seka Predjamski prelom, ki predstavlja nadaljevanje Avškega preloma, na jugozahodnem in severovzhodnem obrobju pa sta pomembnejša še Raški in Idrijski prelom.

Položaj izvirov Vipave je vezan na območje, kjer je neprepustno flišno obrobje najgloblje odstranjeno. Pri mestu Vipavi je bil namreč fliš ob vzhodnem robu Nanosa erodiran pod današnje dolinsko dno. Pogreznjeni del doline so delno zapolnile kvartarne naplavine, ki so zajezile izlivanje kraških voda iz Nanosa in tako povzročile deltasto razporeditev izvirov Vipave. Na redke močnejše in korozijsko razširjene razpoke so vezani izviri Pod farovžem in Za gradom. Pri najjužnejših izvirih Pri kapelici, Pod lipco in Za Perkavcovim mlinom pa izteka voda po lezikah strmo ležečih skladov apnenca (Janež et al. 1997).

## **PREDSTAVITEV METODE**

Osnovne lastnosti izvirov Vipave so torej dobro poznane. Ob močnejših padavinah v zaledju se odzovejo s kratkotrajnimi visokimi pretoki, ki jim sledi hitro upadanje pretoka in daljše obdobje srednjih in nizkih vod. Odziv izvirov na padavine je zelo hiter, zastavlja pa se vprašanje, kakšne so značilnosti te povezave. Tovrstnemu proučevanju odvisnosti med padavinami in odtokom so posvečene številne hidrološke študije, z analizo značilnosti med napajanjem in praznjenjem vodonosnikov pa se ukvarja tudi veliko raziskovalcev na krasu. Skupna ugotovitev njihovih raziskav je, da so kraški vodonosniki zelo zapleteni sistemi in da je težko razviti ustrezna načela in metode, ki bi omogočili simulacijo hidrodinamičnih razmer v teh sistemih. Vsaka izmed predlaganih metod ima

določene prednosti, pa tudi marsikatero pomanjkljivost. Izbira najbolj ustrezne je za vsak posamezen primer odvisna od različnih faktorjev, kot so predpostavljene značilnosti kraškega sistema, pričakovani rezultati raziskave, razpoložljivost podatkov in podobno. Za kraški vodonosnik v zaledju izvirov Vipave sem se na osnovi teh kriterijev odločila za uporabo metode črne skrinjice, ki temelji na primerjavi med vhodno in izhodno funkcijo kraškega sistema. Zastavila sem si dve osnovni vprašanji:

- Ali lahko za obravnavani kraški sistem postavimo model črne skrinjice, s katerim bo možno z zadovoljivo natančnostjo opisati odziv sistema na napajanje?
- Ali lahko na osnovi primerjave med različnimi vhodnimi in izhodnimi funkcijami kraškega sistema sklepamo o njegovih hidrodinamičnih značilnostih?

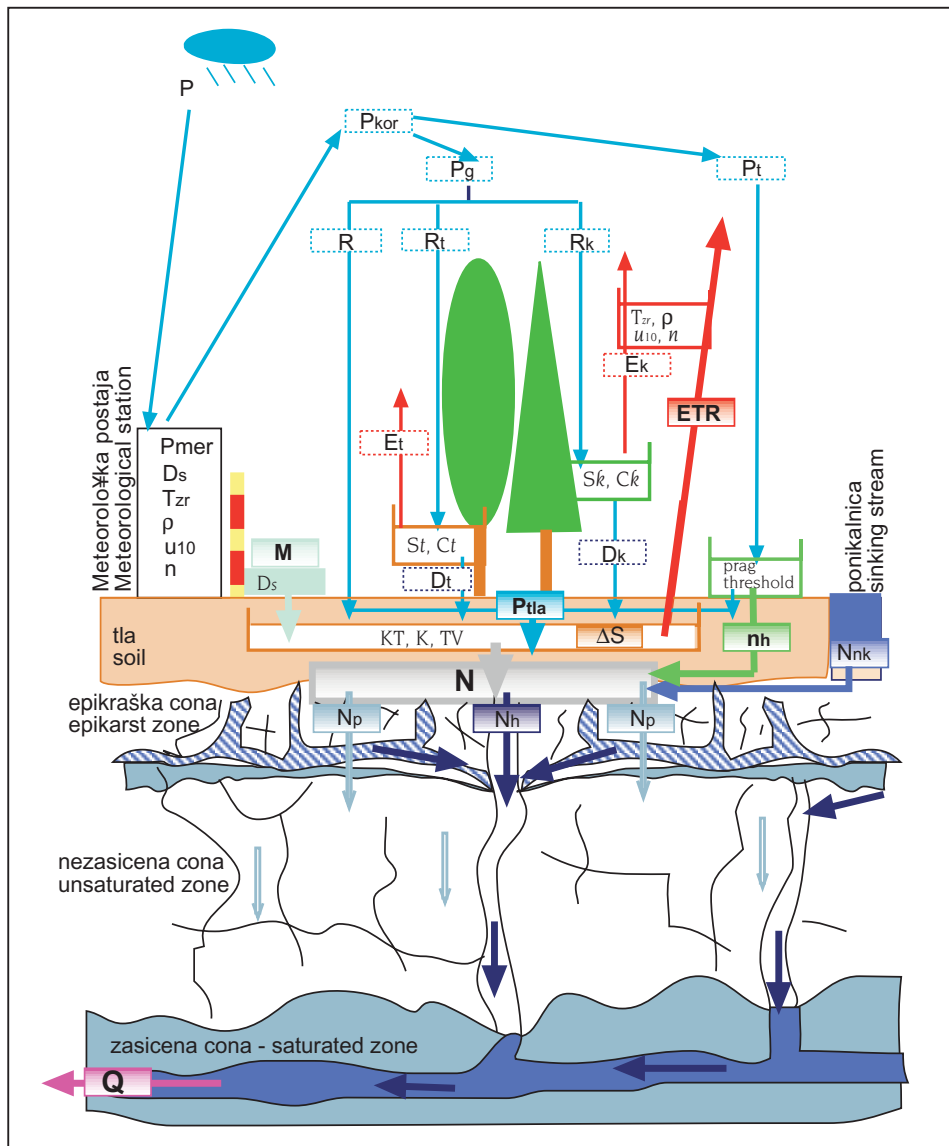
Pri iskanju odgovorov sem uporabila znane raziskovalne metode, ki sem jih glede na zastavljene cilje in razpoložljive podatke ustrezno priredila. Pri metodi črne skrinjice imata fizikalni pomen samo vhodni in izhodni signal, za povezavo med njima pa se uporabljajo različne empirične oz. matematične funkcije, ki odražajo fizikalne procese v sistemu (Chiew et al. 1993). Imenujemo jih funkcije transferja ali funkcije prenosa (»transfer functions«). Njihova osnovna značilnost je, da pretvorijo vhodno funkcijo v odziv sistema, ki ga opisuje izhodna funkcija. Določimo jih na osnovi merjenih vhodnih in izhodnih časovnih serij in jih lahko potem uporabimo za testiranje odziva sistema na različne hidrološke scenarije (Long & Derickson 1999).

Čeprav metoda temelji na načelu linearnih sistemov, so raziskave različnih avtorjev pokazale, da jo lahko uporabimo tudi v kraških vodonosnikih (Knisel 1972, Ashton 1966, Wicks & Hoke 1999). Uporabo načel linearnega sistema za predpostavljeno nelinearne sisteme kraških vodonosnikov lahko po eni strani opravičimo s številnimi težavami, ki spremljajo postavitve determinističnih modelov in zmanjšujejo njihovo praktično uporabnost. Po drugi strani pa mnogi ugotavljajo, da se hidrogrami za velike izvire odzivajo na padavine na podoben način kot hidrogrami za površinski odtok. Čeprav tudi za tega vemo, da veljajo zakoni nelinearnosti, se v praksi vseeno uporabljajo linearne funkcije transferja. Ob predpostavki, da nelinearnost ni prevelika, se je metoda tako uveljavila tudi v kraški hidrogeologiji. Funkcije transferja sicer združujejo vplive različnih kompleksnih procesov, kljub temu pa dajejo pomembno informacijo o delovanju kraških sistemov (Dreiss 1982).

Hidrološka kompleksnost kraških vodonosnikov je predvsem posledica zelo spremenljivih pogojev napajanja in heterogenih lastnosti podzemnega toka. Da bi lahko ocenila vpliv teh lastnosti na odnos med napajanjem in praznjenjem kraškega vodonosnika ter posredno tudi na značilnosti pretakanja in uskladičenja podzemne vode v njem, sem jih obdelala bolj podrobno. Oblikovala sem konceptualni model, ki je shematsko in brez upoštevanja pravih dimenzijskih razmerij prikazan na sliki 2. V njem je sistem obravnavan kot več povezanih podsistemov, povezave pa definirane z enačbami, ki opisujejo fizikalne procese med njimi, z empiričnimi odvisnostmi ali z efektivnimi parametri.

Z uporabo znanih metod za določitev parametrov, ki vplivajo na infiltracijo padavin, in z upoštevanjem načela vodne bilance sem najprej izdelala podrobno oceno napajanja kraškega vodonosnika v zaledju izvirov Vipave. Ta splošen pristop sem razširila v predpostavko, da lahko dobimo z natančno oceno napajanja dovolj dobre podatke, ki jih je možno uporabiti kot vhodno funkcijo pri nadaljnji analizi hidrodinamičnih značilnosti obravnavanega kraškega sistema. Na ta način lahko zmanjšamo težave zaradi oscilacij funkcij transferja, saj se te pojavljajo v veliki meri kot posledica napak v vhodnih podatkih in nelinearnosti zaradi procesov, ki vplivajo na padavine pred infil-

tracijo. Številne študije so tudi pokazale, da ima pomembno vlogo pri nadaljnem pretakanju in uskladiščenju infiltrirane vode že njena razporeditev v epikraški coni. Zato sem v naslednji fazi predpostavila še časovno distribucijo napajanja na več komponent. Uporabila sem metode analize hidrogramov, ki so splošno znane in pogosto rabljene v praksi.



Sl. 2: Konceptualni model obravnavanega kraškega sistema.

Fig. 2: Conceptual model of the studied karst system.

Za oceno vloge procesov, ki vplivajo na infiltracijo in časovne razporeditve napajanja pri delovanju kraških vodonosnih sistemov pa sem nato postavila več različic osnovnega modela. Najprej sem primerjala kar merjene padavine in pretoke. Nato sem kot vhodno funkcijo privzela ocenjene vrednosti napajanja, končno pa upoštevala še njeno časovno distribucijo na počasno in hitro komponento. S spreminjanjem značilnosti vhodnega signala sem se tako skušala čim bolj približati realnim razmeram.

Za testiranje postavljenih hipotez sem uporabila nekoliko prirejeno metodo črne skrinjice. Namesto za posamezne padavinske dogodke sem primerjala vhodne in izhodne funkcije za celotno obdobje dveh hidroloških let od 25.8.1993 do 23.8.1995 in tako v analizi upoštevala razmere pri različnih hidroloških pogojih. Za postavljene modele sem določila ustrezne funkcije transferja, ki sem jih nato skupaj z merjenimi vhodnimi parametri uporabila pri povratnem izračunu vrednosti praznjenja oz. pretokov izvirov Vipave. Za merilo ustreznosti modelov sem postavila točnost simulacije, ki se nanaša na sposobnost funkcije transferja, da reproducira pretoke, na osnovi katerih je bila določena. Glede na ujemanje merjenih in izračunanih pretokov sem tako ocenila primernost postavljenih modelov, glede na zgradbo in lastnosti teh modelov pa sklepala o vlogi funkcije napajanja in njene časovne distribucije pri pretakanju in uskladiščenju vode v kraškem sistemu. Pri uporabljeni metodi sicer ni bilo možno povsem izključiti napak pri določitvi vhodnih in izhodnih parametrov sistema, pa tudi privzete načel linearosti ne ustreza povsem realnim razmeram. Kljub temu sem ocenila, da je ob predpostavki zadovoljive točnosti simulacije testiranje njene uporabnosti smiselno in da bo na osnovi dobljenih rezultatov možno sklepati o značilnostih delovanja kraških vodonosnih sistemov.

## OCENA NAPA JANJA

Napajanje vodonosnika opisuje tok vode, ki doseže stalni nivo podzemne vode in ima za posledico povečanje količine uskladiščene vode (Lerner et al. 1990). Osnovni vir so padavine, nanje pa pred infiltracijo vplivajo še nekateri drugi faktorji in procesi. Kot vhodno funkcijo obravnavanega kraškega sistema sem tako privzela funkcijo napajanja, ki temelji na izmerjenih padavinah, upoštevani pa so še korekcija merjenja ter vplivi prestrezanja padavin v vegetacijskem pokrovu, snežnih padavin in taljenja snega, evapotranspiracije in uskladiščenja vode v tleh, pa tudi sekundarnega napajanja s ponikalnicami, ki zbirajo površinsko vodo na flišnem obrobju.

Napajanje je določeno z naslednjo osnovno enačbo bilance vode v tleh (Sl. 2):

$$N = (P_{\text{tla}} + M - \text{ETR} - \Delta S) + n_{\text{h}} + N_{\text{nk}}$$

V enačbi, kjer je  $N$  napajanje, so  $P_{\text{tla}}$  padavine, ki jih ne prestreže vegetacijski pokrov in dejansko dosežejo tla,  $M$  predstavlja količino staljenega snega,  $\text{ETR}$  realno evapotranspiracijo in  $\Delta S$  spremembo vlažnosti tal. Vključen je še vpliv neposrednega napajanja  $n_{\text{h}}$ , ki opisuje proces infiltracije vode tudi v obdobjih deficita v vlažnosti tal. Ti parametri definirajo primarno infiltracijo v kraškem delu zaledja, pri končni oceni napajanja pa sem primarni prištela še sekundarno infiltracijo  $N_{\text{nk}}$ , ki jo predstavljajo merjeni oz. ocenjeni pretoki ponikalnic s fliša na nekraškem obrobju.

Kar okrog 4/5 zaledja izvirov Vipave pokriva gozd, zato je delež padavin, ki jih vegetacijski pokrov prestreže, pomemben. Po definiciji je prestrezanje padavin ali intercepcija proces zadrže-



vanja padavin na vegetacijskem pokrovu, izguba zaradi prestrezanja pa predstavlja delež te vode, ki se je z evaporacijo vrnila v ozračje. Odvisna je od tipa in stopnje razvoja vegetacije ter intenzitete, trajanja, frekvence in oblike padavin. Prestrezanje padavin predstavlja dodatek k izgubi zaradi evapotranspiracije (Dingman 1994). Neposredno je izgube zaradi prestrezanja praktično nemogoče meriti, zato se pogosto uporabljajo različni konceptualni modeli, ki temeljijo na oceni vodne bilance za uskladiščenje v krošnjah dreves in na deblih. Za primer zaledja Vipave sem tako privzela Rutterjev model (Rutter et al. 1971), kjer so ločeno obravnavani trije deli: padavine, ki direktno prehajajo skozi drevesni sestoj  $R$  ter padavine, ki dosežejo krošnje dreves  $R_k$  ali drevesna debela  $R_d$  (Sl. 2). Del padavin, ki pade na krošnje dreves, izhlapi zaradi evaporacije  $E_k$ , del pa se drenira do tal  $D_k$ . Razmerje med obema procesoma je odvisno od razlike med višino vode na krošnji  $C_k$  in kapaciteto krošnje  $S_k$ . Podobni odnosi veljajo tudi za bilanco vode, ki doseže drevesna debela. Skupna količina padavin, ki dosežejo tla, je za območje gozdne vegetacije določena kot vsota padavin, ki neposredno dosežejo tla, odtoka iz krošnje in odtoka po deblu. Za negozdna območja pa je privzeto, da padavine neovirano dosežejo tla.

Posebej so obravnavane snežne padavine, ki se uskladiščijo na površini kot snežna odeja debeline  $D_s$  in prispevajo k funkciji napajanja šele z določenim časovnim zaostankom, ko se ob ugodnih klimatskih razmerah sneg začne taliti. Njihov delež je v zaledju izvirov Vipave pomemben, saj se prvi sneg lahko pojavi že novembra, pogosto pa se snežna odeja ohrani do maja. Za oceno količine staljenega snega sem uporabila enačbe U.S. Army Corps of Engineers (1960). To so empirične formule, ki so bile definirane na osnovi terenskih opazovanj in merjenj na določenih lokacijah, vendar pa sem jih zaradi pomanjkanja ustreznih podatkov privzela tudi za obravnavano območje. Pri tem je bila seveda storjena določena napaka, ki pa se ji ni bilo mogoče izogniti. Enačbe omogočajo izračun količine staljenega snega za gozdna in negozdna območja ter za taljenje brez ali ob dežju v odvisnosti od srednje dnevne temperature zraka, količine dežja in hitrosti vetra. Glede na znane vegetacijske razmere in merjene meteorološke parametre sem tako s kombinacijo teh osnovnih enačb določila vrednosti parametra  $M$ .

Ta je skupaj s parametrom  $P_{\text{tla}}$  v postavljeni hidrološki bilanci vir vode, evapotranspiracija pa z vračanjem vode v atmosfero opisuje njeno porabo. Vključuje vse procese, pri katerih prehaja voda iz tekočega ali trdnega stanja na ali blizu površine tal v vodno paro ozračja. Zelo pogosto se za njen izračun uporablja Penmanova enačba ali razne izpeljanke te osnovne enačbe. Glede na kvaliteto in obseg meteoroloških podatkov v zaledju Vipave sem za oceno potencialne evapotranspiracije ETP po literaturi povzela izpeljanko iz osnovne Penmanove enačbe, pri kateri so bili osnovni koeficienti prilagojeni pogojem evaporacije in transpiracije z območij, poraslih z vegetacijo (Shaw 1994). V enačbi so bili uporabljeni 4 meteorološki parametri: temperatura zraka  $T_{\text{zr}}$ , relativna vlažnost zraka  $p$ , hitrost vetra 10 m nad tlemi  $u_{10}$  in osončenost  $n$ .

Opisane metode omogočajo določitev količine padavin, ki dejansko dosežejo tla, količine staljenega snega in potencialne evapotranspiracije, ocena realne evapotranspiracije ETR in sprememb uskladiščenja vode v tleh pa je odvisna od hidroloških karakteristik tal. Vlažnost tal  $S$  predstavlja vodo, ki se zadržuje v tleh zaradi delovanja kapilarnih sil. Je zelo občutljiva na vpliv padavin in evapotranspiracije, zato se ob spremembah teh dveh parametrov stalno pojavljajo tudi spremembe v vlažnosti tal  $\Delta S$ . Kadar so padavine večje od evapotranspiracije, vlažnost tal narašča, dokler ne doseže kapacitete tal  $KT$ . Ta predstavlja vrednost saturacije, pri kateri se pojavi drenaža pod vplivom gravitacije in se začne napajanje. Ko evapotranspiracija preseže padavine, se začne vlažnost tal manjšati. Pri normalnih atmosferskih pogojih pa evapotranspiracija ne more popolnoma izsušiti

tal. Zato se v večini primerov nadaljuje pri maksimalni ali potencialni vrednosti le do trenutka, ko vlažnost tal pade na vrednost koreninske konstante  $K$ . Ta je mera količine vode, ki je na voljo v dosegu korenin, izražena z ekvivalentom dežja. V območju med koreninsko konstanto in točko venenja TV, se realna evapotranspiracija nadaljuje na nižji stopnji. Točka venenja je dosežena, ko je vlažnost tal tako majhna, da rastline ne morejo več črpati vode (Howard & Lloyd 1979).

Upoštevala sem se vpliv neposrednega napajanja, ki opisuje pojav, ko pride padavinska voda do vodonosnika skozi razpoke in infiltracija ni pogojena s predhodno zapolnitvijo deficita vlažnosti tal (Rushton & Ward 1979). Glede na ugotovitve iz literature sem tako za negozdna območja privzela metodo določitve praga, kjer predstavlja količina padavin, ki presega prag, neposredno napajanje, ostanek pa se porablja za zapolnjevanje deficita vlažnosti tal.

Vse opisane postopke sem združila v model ocene primarnega napajanja. Kot vhodne podatke sem uporabila merjene dnevne vrednosti temperature zraka, relativne vlažnosti in hitrosti vetra z meteorološke postaje Nanos-Ravnik in osončenosti s postaje Postojna ter dnevni padavin in debelin snežne odeje v padavinskih postajah Nanos-Ravnik, Hrušica in Podkraj za obdobje dveh hidroloških let od 25.8.1993 do 23.8.1995. Razporeditev vegetacije sem povzela po vegetacijski karti Postojne (Puncer et al. 1982), sestavo tal pa po pedoloških kartah, ki mi jih je posredoval Center za pedologijo in varstvo okolja. Kapaciteto krošnje in debela ter razporeditev padavin nad vegetacijskim pokrovom, hidrološke karakteristike tal in vrednost praga neposrednega napajanja sem določila glede na znane vrednosti iz literature, potem pa sem jih vključila v model ocene napajanja kot kalibracijske parametre (Petrič 2000).

Poleg primarnega je za zaledje izvirov Vipave značilno tudi sekundarno napajanje, ki ga predstavljajo ponikalnice s fliša na severozahodnem obrobju Pivške kotline. V obdobju dveh hidroloških let 1993/1995 so bili merjeni dnevni pretoki Lokve in Belščice, za manjše ponikalnice pa so bili ocenjeni samo minimalni in maksimalni pretoki. Na osnovi primerjave med temi obstoječimi podatki sem tako določila dnevne vrednosti sekundarnega napajanja v zaledju izvirov Vipave, ki pa predstavlja le okrog 6 % celotnega napajanja. Poseben problem je ocena vpliva površinskega toka Bele. Z različnimi posrednimi metodami je bila namreč dokazana zveza Bele z izviri Vipave, poleg tega pa se v strugo Bele stekajo tudi občasni izviri Vipave. Vendar pa je bila zaradi pomanjkanja ustreznih podatkov možna le približna ocena odnosa med Belo in izviri Vipave, ki sem jo nato upoštevala samo kot korekcijo pri določitvi funkcije praznjenja obravnavanega kraškega vodonosnika.

V končni model ocene napajanja sem tako vključila ocenjene dnevne vrednosti primarnega in sekundarnega napajanja iz kraškega in nekraškega dela zaledja in ga kalibrirala s primerjavo skupnega napajanja in praznjenja v obdobju dveh hidroloških let od 25.8.1993 do 23.8.1995. Z izbiro ustreznih vrednosti kalibracijskih parametrov je bilo za obe hidrološki leti doseženo dobro ujemanje (Petrič 2000), zato sem postavljen model ocene napajanja ocenila kot primeren za uporabo v nadaljnjih analizah.

## KOMPONENTE NAPAJANJA

Z vključitvijo funkcije napajanja so bili upoštevani procesi, ki vplivajo na infiltracijo padavinske vode v kraški vodonosni sistem. Odziv izvirov na napajanje pa je v veliki meri odvisen tudi od značilnosti pretakanja in uskladiščenja infiltrirane vode v tem sistemu. Številne študije so pokazala

le, da ima pomembno vlogo pri tem epikraška cona kot tisti kontrolni faktor, ki določa časovno distribucijo napajanja. Ob visokih vodah epikras infiltrira padavinsko vodo in je en del hitro prenesene v mrežo kanalov, ostanek pa se uskladišči v bazi epikraške cone. Ob nizkih vodah pa se del vode, ki je uskladiščena v epikraški coni, počasi odteka v slabše prepustne cone vodonosnika. Te značilnosti sem skušala izraziti z razdelitvijo funkcije napajanja na počasno  $N_p$  in hitro komponento  $N_h$ . Uporabila sem metodo hidrološke bilance, ki omogoča tudi oceno časovne spremenljivosti te razdelitve (Jeannin & Grasso 1995). Analiza obsega izdelavo vodne bilance znotraj posameznih padavinskih intervalov, ki vključujejo padavinske dogodke ali skupine padavinskih dogodkov. Odstotni delež počasnega in hitrega napajanja je nato določen za vsakega izmed izbranih padavinskih intervalov. Znotraj vsakega intervala je najprej ločen bazni tok. Območje pod krivuljo pretoka brez baznega toka predstavlja parameter  $Q'$ , ki ga imenujejo volumen hitrega toka. Vodna bilanca temelji na primerjavi tega parametra z volumnom napajanja v istem padavinskem intervalu. Merjeni volumen hitrega toka tako predstavlja hitro napajanje, razlika med napajanjem in volumnom hitrega toka pa spremembo rezerv v slabše prepustnih conah in s tem počasno napajanje. V obdobju dveh hidroloških let 1993/1995 prevladuje hitro napajanje, v nekaterih padavinskih intervalih pa prevladuje tudi počasna komponenta. Povprečni vrednosti za celotno obdobje sta 62 % hitrega in 38 % počasnega napajanja. Na osnovi ugotovljenega razmerja med počasno in hitro komponento znotraj posameznih padavinskih intervalov sem določila dnevne vrednosti počasnega in hitrega napajanja. Na dobljene vrednosti vpliva natančnost ocene napajanja, izbran postopek separacije hidrograma in izbrana metoda določitve deležev obeh komponent napajanja, kljub temu pa sem predpostavila, da so rezultati primerni za uporabo v nadaljnjih analizah.

## **ZNAČILNOSTI ODNOSA MED NAPAJANJEM IN PRAZNJENJEM**

### **FUNKCIJE TRANSFERJA**

V kraškem vodonosnem sistemu se stalno odvijajo procesi, na katere vplivajo vhodni parametri (padavine, ponikalnice, klimatske razmere, ...), njihovi rezultati pa se odražajo na izhodnih parametrih (pretoki, fizikalno-kemične lastnosti izvirov, ...). Povezavo med vhodnim in izhodnim signalom lahko izrazimo s funkcijo, ki jo imenujemo konvolucija. Njene značilnosti so predstavljene v različnih hidroloških študijah, osnove pa so povzete po splošni matematični literaturi. Odnos med padavinami in pretokom je definiran kot:

$$Q(t) = Z(t) * P(t)$$

kjer sta  $Q(t)$  izhodna in  $P(t)$  vhodna funkcija,  $Z(t)$  pa funkcija transferja, za katero se je v mednarodni hidrološki literaturi uveljavilo tudi ime »kernel«. Za veljavnost zgornjega izraza morata biti izpolnjena pogoja o stacionarnosti in linearnosti sistema. Prvi pogoj zahteva, da odziv sistema ni odvisen od časa in da lahko z enako funkcijo transferja opišemo odvisnost med  $Q(t)$  in  $P(t)$  ter  $Q(t-t_1)$  in  $P(t-t_1)$ . Za izpolnitev drugega pogoja morata veljati zakon proporcionalnosti (večkratniku vhodne funkcije ustreza enak večkratnik izhodne funkcije) in zakon superpozicije (vhodni funkciji, ki je enaka vsoti dveh podfunkcij, ustreza izhodna funkcija, ki je enaka vsoti dveh izhodnih funkcij, ki sta dobljeni posebej za vsako vhodno podfunkcijo). Če so ti pogoji izpolnjeni, lahko za celotno časovno serijo odvisnost izrazimo v integralski obliki:

$$Q(t) = \int_0^t Z(t-\tau) \cdot P(\tau) d\tau$$

kjer je  $\tau$  čas impulznega odziva sistema. Oviro pri uporabi opisanih odnosov za analizo kraških sistemov predstavlja dejstvo, da prej naštetih pogoji za veljavnost zgornje enačbe niso izpolnjeni. Kljub temu se je metoda v številnih raziskavah kraških vodonosnikov pokazala kot primerna ob predpostavki, da nelinearnost ni prevelika. Za dve ločeni, končni seriji, ki jih običajno primerjamo, lahko konvolucijski integral izrazimo v diskretizirani obliki. Ker kraški sistem ni linearen, poleg tega pa se v vhodnih in izhodnih funkcijah pojavljajo različne napake, je v enačbo vključena tudi ta napaka:

$$Q(j) = \Delta t \cdot \sum_{k=0}^j (Z(j-k) \cdot P(k)) + \varepsilon(j)$$

Pri tem je  $\Delta t$  dolžina časovnega intervala podatkov,  $\varepsilon(j)$  pa napaka, ki je posledica nelinearnosti sistema ali napak v vhodni in izhodni funkciji sistema.

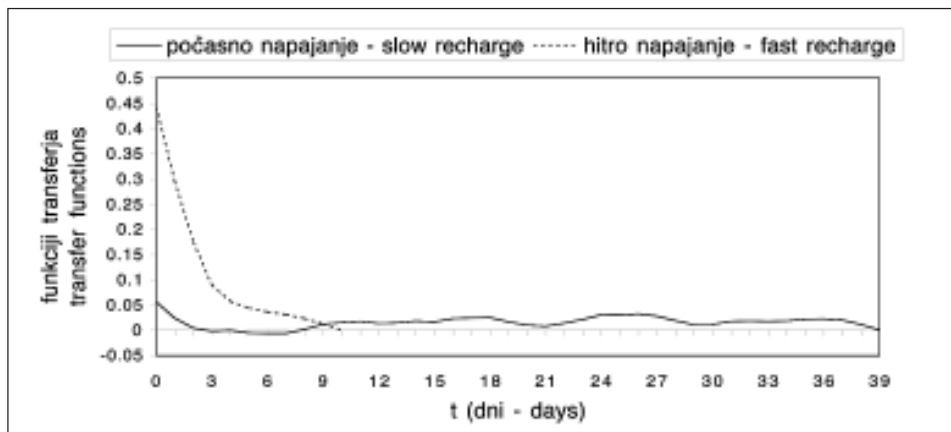
Tudi ocena značilnosti odnosa med napajanjem in praznjenjem vodonosnika v zaledju izvirov Vipave temelji na predstavljeni enačbi, zaradi specifičnih značilnosti kraških sistemov pa sem upoštevala nekatere korekcije. V osnovni obliki sem jo uporabila za primerjavo padavin in pretokov, pri modelu napajanje - praznjenje pa sem kot vhodni signal namesto padavin privzela funkcijo napajanja. Prav procesi, ki so povezani s klimatskimi vplivi in bilanco vode v tleh, so namreč eden izmed pomembnih razlogov za nelinearnost v kraškem vodonosnem sistemu. Posebej sem obdelala še funkcijo praznjenja, saj sem merjene pretoke izvirov Vipave korigirala glede na vplive površinskega toka Bele. Končno sem glede na ugotovljene razlike v pretakanju in uskladiščenju infiltrirane vode predpostavila še vpliv epikraške cone na časovno distribucijo napajanja in ga razdelila na hitro in počasno komponento. Enačbo sem za ta primer zapisala v naslednji obliki:

$$Q(j) = \sum_{k=0}^j Z_h(j-k) \cdot N_h(k) + \sum_{k=0}^j Z_p(j-k) \cdot N_p(k) + \varepsilon(j)$$

kjer je  $Q(j)$  praznjenje vodonosnika,  $N_h(k)$  in  $N_p(k)$  hitra in počasna komponenta napajanja,  $Z_h(j-k)$  in  $Z_p(j-k)$  funkciji transferja za počasno in hitro napajanje,  $\varepsilon(j)$  pa napaka.

Po zgornjih enačbah sem tako vsako merjeno dnevno vrednost pretoka izvirov Vipave oz. praznjenja vodonosnika v njihovem zaledju v obdobju dveh hidroloških let od 25.8.1993 do 23.8.1995 izrazila kot funkcijo merjenih padavin oz. ocenjenih dnevni vrednosti napajanja ali njegovih komponent ter ustreznih funkcij transferja. Rezultat je sistem linearnih enačb, v katerem so neznanke komponente funkcij transferja. Za poenostavitev izračuna sem na osnovi predpostavljenega trajanja teh funkcij določila število členov v enačbi. Ocena njihovega trajanja je temeljila na rezultatih primerjave vhodnih in izhodnih funkcij z metodo križne korelacije, zaradi primerjave pa sem za modela padavine - pretok in napajanje - praznjenje privzela dve različni dolžini funkcij transferja (Petrič 2000). Na ta način sem dobila skupno 5 različic osnovnega modela. Za reševanje postavljenih sistemov linearnih enačb sem uporabila metodo najmanjših kvadratov (Vidav 1976) in za vsak model določila ustrezne funkcije transferja, pri katerih je doseženo najboljšje ujemanje med vhodnim in izhodnim signalom in je rezidualna napaka najmanjša.

Kot primer sta na sliki 3 prikazani dobljeni funkciji transferja za model, v katerem je bilo napajanje razdeljeno na počasno in hitro komponento. Njuna oblika kaže, da se izviri odzovejo na hitro napajanje s povečanjem pretoka že v prvih dneh po padavinskem dogodku. Počasno napaja-



Sl. 3: Funkciji transferja za počasno in hitro napajanje.

Fig. 3: Transfer functions for slow and fast recharge.

nje pa se razporedi na daljše časovno obdobje, ki je v obravnavanemu primeru tudi omejeno s predpostavljeno dolžino trajanja funkcije. Vrednosti okrog 0 v začetnem delu se ujemajo z ugotovitvijo, da je zaradi povečanega potenciala v kraških kanalih, ki je posledica hitrega napajanja, iztok iz con slabše prepustnosti zanemarljiv. Pozitivne vrednosti v nadaljevanju odražajo postopno izcejanje vode, ki je bila v sistem infiltrirana kot počasno napajanje.

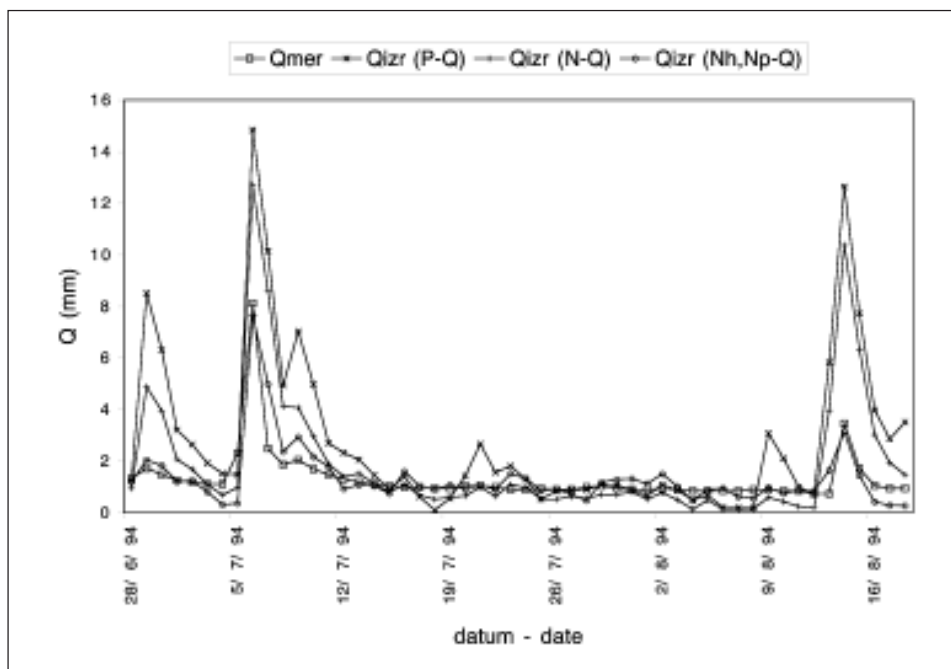
Pojavljajo pa se določene oscilacije, ki jih je težko natančno opredeliti. Vsaj deloma so prav gotovo posledica napak pri oceni funkcij napajanja in praznjenja, pa tudi predpostavke o linearnosti, ki ne ustreza povsem realnim razmeram.

### OCENA USTREZNOSTI POSTAVLJENIH MODELOV

Kot merilo ustreznosti modelov sem postavila točnost simulacije, ki se nanaša na sposobnost funkcij transferja, da reproducirajo pretoke, na osnovi katerih so bile določene. Dobljene funkcije transferja sem v konvolucijskih enačbah skupaj z merjenimi vhodnimi parametri uporabila pri simulaciji dnevnih pretokov oz. vrednosti praznjenja, potem pa tako izračunane vrednosti primerjala z izmerjenimi (Sl. 4).

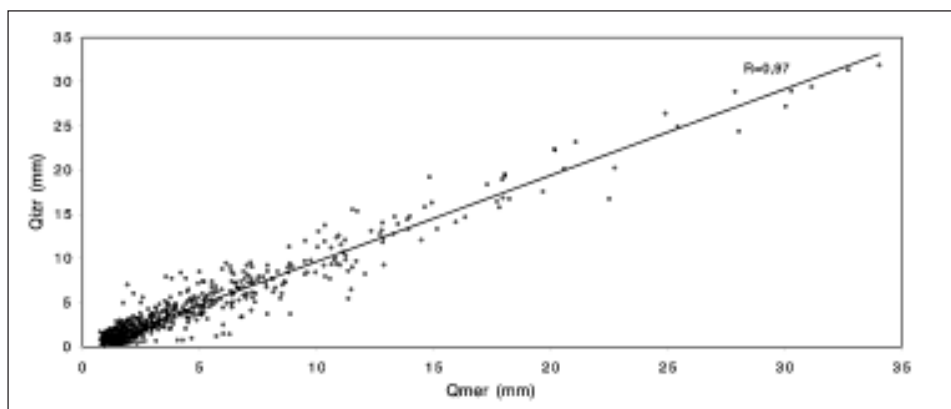
Na sliki predstavlja za izbran časovni interval  $Q_{mer}$  merjene pretoke,  $Q_{izr}$  pa izračunane vrednosti za modele padavine - pretok, napajanje - praznjenje ter počasno in hitro napajanje - praznjenje. Razlike med modeli so očitne in že na osnovi prikazanega diagrama lahko ocenimo, da je značilno najboljše rezultate dal zadnji.

Za potrditev te prvotne ocene sem ujemanje med merjenimi in izračunanimi vrednostmi praznjenja testirala še z različnimi statističnimi metodami. Ena bolj enostavnih je metoda regresijskih diagramov in določitve koeficienta korelacije, ki podaja stopnjo ujemanja med merjenimi in izračunanimi vrednostmi in ga uporabljamo kot mero natančnosti. Potrjena je bila ugotovitev o najboljšem ujemanju pri modelu, v katerem je bila upoštevana razdelitev napajanja na počasno in hitro komponento (Sl. 5), pri ostalih pa so bila odstopanja večja.



Sl. 4: Primerjava merjenih in izračunanih pretokov za 3 različice osnovnega modela.

Fig. 4: Comparison between measured and calculated discharges for 3 variants of the basic model.



Sl. 5: Korelacija med merjenimi in izračunanimi pretoki za model počasno in hitro napajanje - praznjenje.

Fig. 5: Correlation between measured and calculated discharges for the model slow and fast recharge - discharge.

Drugo statistično orodje sta t.i. objektivni funkciji (Chiew et al. 1993):

$$OBJ1 = \sum_{i=1}^n (Q_{izr_i} - Q_{mer_i})^2$$

$$OBJ2 = \sum_{i=1}^n (Q_{izr_i}^{0.2} - Q_{mer_i}^{0.2})^2$$

kjer je  $Q_{izr}$  izračunano in  $Q_{mer}$  merjeno praznjenje. Prva funkcija bolj odraža razmere pri visokih vodah, druga pa ima večjo težo pri oceni simulacije nizkih pretokov. Vrednosti parametrov so izražene relativno glede na dobljeno najnižjo vrednost. Ker so odvisne od velikosti uporabljenih podatkov, se lahko namreč absolutne vrednosti razlikujejo za več redov velikosti.

Uporabila sem še dva brezdimenzijska parametra in sicer koeficient določenosti  $D$ , ki meri stopnjo ujemanja med merjenimi in izračunanimi vrednostmi in koeficient učinkovitosti  $E$ , ki meri sposobnost modela, da reproducira merjene vrednosti. S koeficientom učinkovitosti je možna tudi ocena usmerjenosti. Če je korelacija med merjenimi in izračunanimi vrednostmi velika, korelacijska premica pa odstopa od premice  $y = x$ , je koeficient učinkovitosti manjši od koeficienta določenosti. Koeficient določenosti izračunamo po naslednji enačbi (Aitken 1973):

$$D = \frac{\sum (Q_m - Q_{msr})^2 - \sum (Q_m - Q_{reg})^2}{\sum (Q_m - Q_{msr})^2}$$

kjer so  $Q_m$  merjeni pretoki,  $Q_{msr}$  srednja vrednost merjenih pretokov in  $Q_{reg}$  pretoki, ocenjeni na osnovi regresijske premice. Podobno obliko ima koeficient učinkovitosti (Aitken 1973):

$$E = \frac{\sum (Q_m - Q_{msr})^2 - \sum (Q_m - Q_{reg})^2}{\sum (Q_m - Q_{msr})^2}$$

Nov parameter je  $Q_{izr}$ , ki predstavlja izračunane pretoke. Nekoliko drugačen pristop k oceni ujemanja merjenih in izračunanih pretokov je uporabljen pri metodi kumulativne krivulje ostan-kov. Pomembna razlika je ta, da so zaradi kumulativnega načina izračuna upoštevani tudi predhodni dogodki in zato s to metodo lahko zaznamo sistematično napako. Najprej sem določila ostanke tako, da sem od posameznih mesečnih vrednosti odštela srednji mesečni pretok. Dobljene ostanke sem kumulativno seštela in zaporedje mesečnih ostan-kov predstavlja kumulativno krivuljo ostan-kov. Primerjala sem jih z uporabo koeficienta kumulativne krivulje ostan-kov  $R$ , ki je definiran kot (Aitken 1973):

$$R = \frac{\sum (D_m - D_{msr})^2 - \sum (D_m - D_{reg})^2}{\sum (D_m - D_{msr})^2}$$

$D_m$  predstavlja odstopanje od srednje vrednosti kumulativne krivulje ostan-kov za merjene pre-toke,  $D_{msr}$  srednjo vrednost odstopanj od srednje vrednosti kumulativne krivulje ostan-kov za merje-ne pretoke in  $D_{izr}$  odstopanje od srednje vrednosti kumulativne krivulje ostan-kov za izračunane pretoke. Opisani brezdimenzijski statistični parametri imajo pri popolnem ujemanju vrednost 1, v praksi pa so koeficienti glede na stopnjo ujemanja ustrezno manjši. Za pet obravnavanih različic osnovnega modela so dobljene vrednosti prikazane v tabeli 1. V prvem delu so primerjane dnevne, v drugem pa mesečne vrednosti.

Tabela 1: Statistični parametri.

	Dnevno			Mesečno					
	r	OBJ1	OBJ2	OBJ1	OBJ2	D	E	R	
Padavine - pretoki (dolžina funkcije transferja 7 dni)	0,88	3,5	6,6	4,7	2,6	0,81	0,58	0,43	
Padavine - pretoki (dolžina funkcije transferja 30 dni)	0,89	3,2	1,5	4,2	2,4	0,90	0,65	0,50	
Napajanje - praznjenje (dolžina funkcije transferja 9 dni)	0,94	1,9	2,8	2,3	2,2	0,92	0,78	0,78	
Napajanje - praznjenje (dolžina funkcije transferja 30 dni)	0,95	1,5	0,9	1,6	1,5	0,99	0,87	0,82	
Počasno in hitro napajanje - praznjenje	0,97	1,0	1,0	1,0	1,0	0,98	0,90	0,92	

Rezultati v tabeli kažejo, da pomeni bistveno izboljšavo uvedba funkcije napajanja namesto padavin. Tudi predpostavljeno daljše trajanje funkcije transferja ima pozitiven vpliv na rezultate. Analiza pa je potrdila predhodne ugotovitve, da je ujemanje najboljše v zadnjem primeru. Na osnovi obsežne študije primerjave simulacij mesečnih pretokov je Chiew s sodelavci (1993) zaključil, da lahko oceno pretoka ovrednotimo kot povsem sprejemljivo, če je koeficient učinkovitosti večji od 0,9 in srednji izračunani pretok znotraj 10 % srednjega merjenega pretoka. Rezultati so sprejemljivi, če je koeficient učinkovitosti večji od 0,6 in je srednji izračunani pretok znotraj 15 % srednjega merjenega pretoka. Ob privzetju teh standardov lahko zaključim, da je povsem sprejemljiv model, pri katerem je bila vhodna funkcija napajanja razdeljena na dve komponenti, sprejemljivi pa ostali primeri. Izjema je model, kjer so bile kot vhodna funkcija privzete padavine in predpostavljena dolžina funkcije transferja 7 dni.

## SKLEPI

Ocena značilnosti odnosa med napajanjem in praznjenjem kraškega vodonosnika v zaledju izvirov Vipave je bila izdelana na osnovi primerjave različnih variant osnovnega modela črne skrinjice. Glede na ujemanje med merjenimi in izračunanimi vrednostmi praznjenja sem ovrednotila primernost postavljenih modelov, glede na njihovo zgradbo in lastnosti pa sklepala o vlogi funkcije napajanja in njene časovne distribucije pri pretakanju in uskladiščenju vode v kraških vodonosnih sistemih. Statistična analiza je pokazala, da prinese bistveno izboljšavo uvedba funkcije napajanja namesto padavin. Pomembna je tudi dolžina trajanja funkcij transferja, saj se je še posebej pri nizkih vodostajih pokazalo, da ima predpostavljeno daljše trajanje pozitiven vpliv na kakovost dobljenih rezultatov. Primernost postavljenega modela pa se še poveča z razdelitvijo napajanja na počasno in hitro komponento, ki tudi z dobljeno obliko funkcij transferja odraža dva mehanizma delovanja kraškega sistema. Izviri se odzovejo na hitro napajanje s povečanjem pretoka že v prvih



dneh po padavinskem dogodku, počasno napajanje pa se razporedi na daljše časovno obdobje. Vrednosti funkcije transferja za počasno napajanje okrog 0 v začetnem delu se ujemajo z ugotovitvijo, da je zaradi povečanega potenciala v kraških kanalih, ki je posledica hitrega napajanja, iztok iz con slabše prepustnosti zanemarljiv.

Pri statistični analizi izračunani koeficienti so bili dovolj visoki, da lahko postavljen model počasno in hitro napajanje - praznjenje ovrednotimo kot povsem sprejemljiv. Seveda pa odstopanja med merjenimi in izračunanimi vrednostmi ostajajo. Razlog ni le v pomanjkljivostih modela in predpostavljeni linearnosti kraškega sistema, ampak tudi v napakah pri določitvi njegovih vhodnih in izhodnih komponent. Čeprav je bila izdelana natančna ocena napajanja, pa so bile pri njej še vedno zaradi omejitev pri merjenju nekaterih parametrov uporabljene določene predpostavke, ki lahko negativno vplivajo na kakovost rezultatov.

Rezultate opravljene raziskave lahko na koncu povzamem v odgovora na dve osnovni vprašanji, ki sem si ju zastavila na začetku. Na osnovi primerjave med postavljenimi modeli črne skrinjice in opravljene statistične analize lahko zaključim, da je možno z modelom počasno in hitro napajanje - praznjenje z zadovoljivo natančnostjo opisati odziv kraškega sistema na napajanje. Ostajajo pa določena odstopanja, ki so posledica uporabljenih predpostavk pri oblikovanju modela in napak pri oceni vhodnih in izhodnih parametrov.

Opisana metoda se je pokazala kot uporabna tudi za oceno hidrodinamičnih značilnosti kraškega vodonosnika. Z izboljšanjem rezultatov modela ob uvedbi funkcije napajanja namesto padavin je bil izpostavljen pomemben vpliv, ki ga imajo vegetacija ter procesi v ozračju in tleh na količino vode, ki dejansko vstopi v vodonosni sistem. Točnost simulacije se je še povečala ob razdelitvi napajanja na počasno in hitro komponento, kar govori v prid predpostavki o dvojnosti mehanizma delovanja sistema: o hitrem pretoku skozi kraško drenažno mrežo in daljšem zadrževanju vode v sistemu zaradi uskladiščenja v conah slabše prepustnosti.

## LITERATURA IN VIRI

- Aitken, A.P., 1973: Assessing systematic errors in rainfall-runoff model.- *Journal of Hydrology*, 20, 121-136, Amsterdam.
- Ashton, K., 1966: The analysis of flow data from karst drainage systems.- *Transactions of the Cave Research Group*, 7, 163-203.
- Behrens, H. & R. Benischke & W. Käss & M. Zupan, 1997: Results of the Vipava Area - The Second Tracing Experiment in Spring 1994.- *Acta carsologica, Karst Hydrogeological Investigations in South-Western Slovenia*, 26, 295-301, Ljubljana.
- Buser, S., 1968: Osnovna geološka karta 1:100.000, list Gorica.- *Zvezni geološki zavod Beograd*, Beograd.
- Buser, S. & K. Grad & M. Pleničar, 1967: Osnovna geološka karta 1:100.000, list Postojna.- *Zvezni geološki zavod Beograd*, Beograd.
- Chiew, F.H.S. & M.J. Stewardson & T.A. McMahon, 1993: Comparison of six rainfall-runoff modelling approaches.- *Journal of Hydrology*, 147, 1-36, Amsterdam.
- Dingman, L.S., 1994: *Physical Hydrology*.- Macmillan Publishing Company, 575 pp, New York.
- Dreiss, S.J., 1982: Linear kernels for karst aquifers.- *Water Resources Research*, 18, 865-876, Washington.

- Habe, F., 1970: Predjamski podzemeljski svet.- *Acta carsologica*, 5, 5-94, Ljubljana.
- Habič, P., 1983: Kraški izviri Vipave in njihovo zaledje.- *Acta carsologica*, 11, 41-57, Ljubljana.
- Habič, P., 1989: Kraška bifurkacija Pivke na jadransko črnomoškem razvodju.- *Acta carsologica*, 18, 233-264, Ljubljana.
- Howard, K.W.F. & J.W. Lloyd, 1979: The sensitivity of parameters in the Penman evaporation equations and direct recharge balance.- *Journal of Hydrology*, 41, 329-344, Amsterdam.
- Janež, J. & J. Čar & P. Habič & R. Podobnik, 1997: Vodno bogastvo Visokega krasa.- *Geologija* d.o.o., 167 pp, Idrija.
- Jeannin, P.-Y. & A.D. Grasso, 1995: Estimation des infiltrations efficaces journalières sur le bassin karstique de la Milandrine (Ajoie, JU, Suisse).- *Bulletin d'Hydrogéologie*, 14, 83-93, Neuchâtel.
- Knisel, W.G., 1972: Response of karst aquifers to recharge.- *Hydrology Paper 60*, Colorado State University, 48 pp, Fort Collins, Colorado.
- Kogovšek, J. & M. Knez & A. Mihevc & M. Petrič & T. Slabe & S. Šebela, 1999: Military Training Reserve in Kras (Western Slovenia).- *Environmental Geology*, 38, 1, 69-76, Springer Verlag.
- Lerner D.N. & A.S. Issar & I. Simmers (Eds.), 1990: Groundwater Recharge. A Guide to Understanding and Estimating Natural Recharge.- *International Contributions to Hydrogeology*, Volume 8, 345pp, Verlag Heinz Heise, Hannover.
- Long, A.J. & R.G. Derickson, 1999: Linear systems analysis in a karst aquifer.- *Journal of Hydrology*, 219, 206-217, Amsterdam.
- Petrič, M., 2000: Značilnosti napajanja in praznjenja kraškega vodonosnika v zaledju Vipave.- Doktorska disertacija, Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani, 151 str., Ljubljana.
- Placer, L., 1981: Geološka zgradba jugozahodne Slovenije.- *Geologija*, 24/1, 27-60, Ljubljana.
- Puncer, I. & M. Zupančič & M. Wraber, 1982: Vegetacijska karta Postojna L33-77.- SAZU, Razred za naravoslovne vede, Biološki inštitut Jovana Hadžija, 118 pp, Ljubljana.
- Rushton, K.R. & C. Ward, 1979: The estimation of groundwater recharge.- *Journal of Hydrology* 41, 345-361, Amsterdam.
- Rutter, A.J. & K.A. Kershaw & P.C. Robins & A.J. Morton, 1971: A predictive model of rainfall interception in forests, I. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine.- *Agric. Meteorol.*, 9, 367-380.
- Shaw, E.M., 1994: *Hydrology in Practice*. Third edition.- Chapman & Hall, 569 pp, London.
- U.S. Army Corps of Engineers, 1960: Runoff from Snowmelt.- *Engineering and Design Manuals*, EM 1110-2-1406.
- Vidav, I., 1976: *Višja matematika III*.- Državna založba Slovenije, 557 pp, Ljubljana.
- Wicks, C.M. & J.A. Hoke, 1999: Linear systems approach to modeling groundwater flow and solute transport through karstic basins.- *Karst Modeling*, Karst Waters Institute Special Publication 5, 97-101, Charlottesville, Virginia.

## **CHARACTERISTICS OF THE RECHARGE-DISCHARGE RELATION OF THE KARST AQUIFER IN THE BACKGROUND OF THE VIPAVA SPRINGS (SLOVENIA)**

### **Summary**

The Vipava karst springs are one of the most important water resources in south-western Slovenia. Because of specific characteristics of the karst aquifer and lack of adequate data, exact delineation of their hydrogeological background is not possible. In the study of the characteristics of the recharge-discharge relation the extent of the recharge area was therefore defined based on the known geological conditions, results of tracing tests and hydrochemical analyses, and the water balance method. The central part of the hydrogeological background with an area of around 140 km<sup>2</sup> covers the karst plateaux of Nanos and Hrušica. And the flysch area in the north-western part of the Pivka basin, with several sinking streams that flow underground towards the Vipava springs, belongs to the non-karstic background with the area of around 9 km<sup>2</sup> (Fig. 1).

The karst water emerges at the foothills of the Nanos plateau near the town of Vipava at several permanent and temporary springs. One of them, called Pod lipco (V2) is captured for the water supply of the Vipava valley. Typical karst hydrological regime with high discharges of short duration and longer periods of medium and low waters is characteristic for all the springs. The discharges range between 727 l/s and 70 m<sup>3</sup>/s, and the mean discharge is 6,78 m<sup>3</sup>/s. The highest waters are in November after heavy autumn rains, and in April when also snow melting is important. The lowest discharges are in July and August.

The karst part of the recharge area is built mainly of well karstified Cretaceous and Jurassic carbonate rocks. Characteristic of the area are numerous surface karst forms and karst caves, mostly shafts. Deep karst is developed. The surrounding Eocene flysch acts as an impermeable border. Thrusts, dissected by several neotectonic faults, are typical structure units of this area.

In the presented study of the characteristics of the recharge-discharge relations, answers to these two basic questions were searched for: is it possible to set for the studied karst system a black-box model, which describes with sufficient accuracy the response of the system to the recharge, and is it possible to define the hydrodynamic characteristics of the karst system based on the comparison between its different input and output functions? In the black-box models only the input and output signals have a physical meaning, and the relation between them is defined by different empirical or mathematical functions which reflect the physical processes in the system. They are called the transfer functions and are calculated based on the measured input and output time-series. They can be used to test the response of the system to different hydrological scenarios.

The hydrological complexity of karst aquifers is primarily the consequence of changeable recharge conditions and heterogeneous characteristics of the groundwater flow. A detailed study was made in order to estimate the influence of these properties on the recharge-discharge relation and indirectly also on the characteristics of the flow and storage of water in karst systems (Fig. 2). Different known methods for the estimation of the parameters that influence the infiltration and the principles of water balance were used for the detailed estimation of the recharge of the karst aquifer in the background of the Vipava springs. This general approach was further developed into the assumption that such accurate estimation of the recharge produces acceptable data which can be

used as the input function in further analysis of the hydrodynamic characteristics of the studied karst system. In this way the problems due to the oscillations of the transfer functions can be reduced. Namely, they are to a great extent a consequence of the errors in the input data and non-linearity of the processes that influence the precipitation before infiltration. Also the important influence of the time distribution of the recharge in the epikarstic zone on the further flow and storage of infiltrated water was proved by several studies. Therefore also the time distribution of the recharge function in different components was supposed in the next phase of the research.

To estimate the impact of the processes that influence the infiltration and the impact of the time distribution of the recharge on the hydrodynamic functioning of the karst system, different variants of the basic black-box model were set. First the measured precipitation and discharges were compared. Then the estimated recharge function was used as the input, and finally also its distribution in the slow and the fast component was considered. Instead of comparing the recharge and the discharge of individual storms the input and the output functions for the whole period of two hydrological years from 25 August 1993 to 23 August 1995 were compared. In this way conditions at different hydrological regimes were considered. For all models the transfer functions were defined, and were used then together with the measured input parameters in the reverse calculation of the discharge of the Vipava springs. As a criterion for the model adequacy the accuracy of this simulation was set. This accuracy refers to the capability of the transfer function to reproduce the discharges from which it was derived. Therefore, to define the suitability of the model the correspondence between the measured and the calculated discharges was tested. And according to the structure and the properties of the model the influence of the recharge function and its time distribution on flow and storage in the karst system was evaluated. Using the described method it is not possible to exclude completely the possibilities of errors in the estimation of the input and the output parameters of the system. Also the hydrodynamic characteristics of the karst aquifer are not strictly met by the linear system approach. But in spite of this and assuming that the accuracy of the simulation is satisfactory I assess the evaluation of its applicability as sensible.

Estimation of the recharge function was based on the measured precipitation, but some additional influences on the infiltration (corrections of measured data, interception on vegetative surfaces and evapotranspiration, snow and snow melting, water storage in soil) were considered. Also the secondary recharge by the sinking streams from the surrounding flysch area was added. Different known methods for the estimation of these parameters were used. They were combined into the model for the recharge estimation, which was then calibrated according to the comparison between total recharge and discharge in the period of two hydrological years.

For the separation of the recharge into fast and slow components the method of hydrological balance was used. It gives also information about the time variability of this distribution. In the time of two hydrological years the fast recharge is dominant, but in some precipitation intervals also the slow component prevails. The average values for the whole period are 62 % for the fast and 38 % for the slow component. Based on the stated proportion between fast and slow components in individual precipitation intervals the daily values of fast and slow recharge were calculated.

For lumped, time-invariant linear system the relation between the input and the response of the system can be given by the convolution integral:

$$Q(t) = \int_0^t Z(t-\tau) \cdot P(\tau) d\tau$$

where  $Q(t)$  is the observed output of the system,  $P(t)$  is the input into the system,  $Z(t-\tau)$  is the kernel function,  $t$  represents time and  $\tau$  is the variable of the integration. The use of this equation for the analysis of karst systems is limited due to the fact that the conditions of stationariness and linearity are not strictly met. But in spite of this the method was proved as adequate in several researches of karst systems where the non-linearity is not too large. For two isolated, finite series that are usually related, the convolution integral can be written in a discrete form. As the karst system is not exactly linear, and the input and output series can include errors, also this possible error is considered in the equation:

$$Q(j) = \Delta t \cdot \sum_{k=0}^j (Z(j-k) \cdot P(k)) + \varepsilon(j)$$

where  $\Delta t$  is the time between data points, and  $\varepsilon(j)$  are the residuals of errors due to measurement, sampling interval, or model assumptions that are not strictly met.

Also the study of the characteristics of the recharge-discharge relation of the karst aquifer in the background of the Vipava springs is based on the presented equations, but due to some specific properties of the karst systems also some corrections were used. In the basic form the equation was used for the comparison between measured precipitation and discharge. For the model recharge-discharge the recharge function was used as the input function instead of the precipitation. And for the variant with the distribution of the recharge in fast and slow components the following derivative was applied:

$$Q(j) = \sum_{k=0}^j Z_h(j-k) \cdot N_h(k) + \sum_{k=0}^j Z_p(j-k) \cdot N_p(k) + \varepsilon(j)$$

where  $Q(j)$  is the discharge,  $N_h(k)$  and  $N_p(k)$  the fast and the slow component of the recharge,  $Z_h(j-k)$  and  $Z_p(j-k)$  the transfer functions for fast and slow recharge, and  $\varepsilon(j)$  is the residual error.

According to the upper equation each measured daily value of the discharge of the Vipava springs in the period from 25 August 1993 to 23 August 1995 can be defined as a function of the measured precipitation, estimated daily recharge or estimated values of the slow and the fast recharge component, and the corresponding kernels. In this way the system of linear equations was set in which the unknown quantities are the components of the transfer functions. To simplify the calculation the number of terms in each equation was defined according to the supposed duration of the transfer functions. These values were estimated by the comparison of the input and the output functions of the observed karst aquifer by the method of cross-correlation. The least squares method was used to solve this system of linear equations. For each model the transfer functions that give the best fit between the input and the output signals and the lowest residual errors were defined.

The forms of the transfer functions indicate that the springs react on the fast recharge immediately in the first days after the precipitation event (Fig. 3). The slow recharge is distributed in the longer time period. Values around zero in the first part of the transfer function for the slow recharge are in accordance with the assumption that the outflow from the less permeable zones is negligible. The reason is the increased potential in karst channels which is a result of the fast recharge. In the transfer functions some oscillations occur which are difficult to explain precisely. But at least partly they are the consequence of the errors in the estimation of the input and the

output functions, as well as the result of the assumption of the linearity of the karst system that are not strictly met.

As a criterion for the model adequacy the accuracy of the simulation was set. This accuracy refers to the capability of the transfer function to reproduce the discharges from which it was derived. Defined transfer functions were used together with the measured input parameters in the convolution equations for the simulation of the daily discharges. Then these calculated values were compared with the measured discharges (Fig. 4). The deviations between different models are obvious and already on the base of the presented graph it can be seen that the last model gives the best results. For confirmation of this primary evaluation different statistical methods were used to compare the measured and the simulated values of the discharge. The correlation between the measured and the estimated values is the best for the model with the time distribution of the recharge in fast and slow components (Fig. 5). Also the following statistical parameters were calculated: the coefficient of correlation, the objective functions OBJ1 and OBJ2, the coefficient of determination D, the coefficient of efficiency E, and the residual mass curve coefficient R. For different variants of the basic model the calculated values of these coefficients are listed in the Table 1. They indicate that a significant improvement is reached by the use of the recharge function instead of the precipitation as the input function. Also the assumed longer duration of the transfer function has a positive influence on the results. Finally, also by this statistical analysis it was confirmed that the best results are obtained by the last model with the fast and the slow recharge components. According to the results of Chiew and co-workers such a model can be evaluated as perfectly acceptable. Also other models are in general all acceptable.

Still some discrepancies between the measured and the estimated values remain. Not just as a consequence of the fact that the hydrodynamic conditions of the karst aquifer are not strictly met by the linear system approach, but also because of errors in the estimation or measurement of its input and output data. Although an accurate estimation of the recharge function was made, still several assumptions were applied which can have a negative influence on the quality of the results.

The presented study of the recharge-discharge relation of the karst aquifer in the background of the Vipava springs was based on the comparison between different variants of the basic black-box model. To define the suitability of the models the correspondence between the measured and the calculated discharges was tested. And, according to the structure and the properties of the model, the influence of the recharge function and its time distribution on flow and storage in the karst aquifers was evaluated.

The obtained results can be summarised as the answers to the two basic questions that were raised at the beginning of the research. The model with the time distribution of the recharge in fast and slow components describes the response of the system to the recharge with sufficient accuracy. Still some deviations remain as a consequence of the applied assumptions in the setting up of the model or of the errors in the estimation of the input and the output parameters. By the method used it was also possible to study the hydrodynamic characteristics of karst systems. The important influence of the vegetation and of the processes in atmosphere and soil on the quantity of water that actually enters the karst aquifer was proved. An increase in the accuracy of the simulation was obtained also by the temporal distribution of the recharge in fast and slow components, which is in agreement with the double mechanism of the functioning of the system: fast flow through the karst drainage net and longer retardation in the system with storage of water in less permeable zones.