

# Pregled sledenja voda z umetnimi sledili na kraških območjih v Sloveniji

## Review of water tracing with artificial tracers on karst areas in Slovenia

Metka PETRIČ

Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Titov trg 2, SI-6230 Postojna, Slovenija, e-mail: [petric@zrc-sazu.si](mailto:petric@zrc-sazu.si)

Prejeto / Received 30. 3. 2009; Sprejeto / Accepted 18. 5. 2009

*Ključne besede:* sledenje, umetno sledilo, kras, Slovenija  
*Key words:* tracing, artificial tracer, karst, Slovenia

### Izvleček

V domači in tuji strokovni periodiki so bila od začetka 20. stoletja do danes objavljena poročila o več kot dvesto sledenjih z umetnimi sledili na kraških območjih v Sloveniji. Na osnovi pregleda tako zbranih podatkov so v članku na kratko predstavljeni rezultati sledenj, ki so bila opravljena v zadnjih dvajsetih letih in navedeni viri, po katerih so povzeti. Za celotno obdobje približno stotih let so opisane skupne značilnosti opravljenih poskusov. Pridobljene izkušnje potrjujejo uporabnost metode pri raziskovanju kraških vodonosnikov, kažejo pa tudi, da je potrebno za doseganje kakovostnih rezultatov pred izvedbo izdelati natančen načrt sledenja.

### Abstract

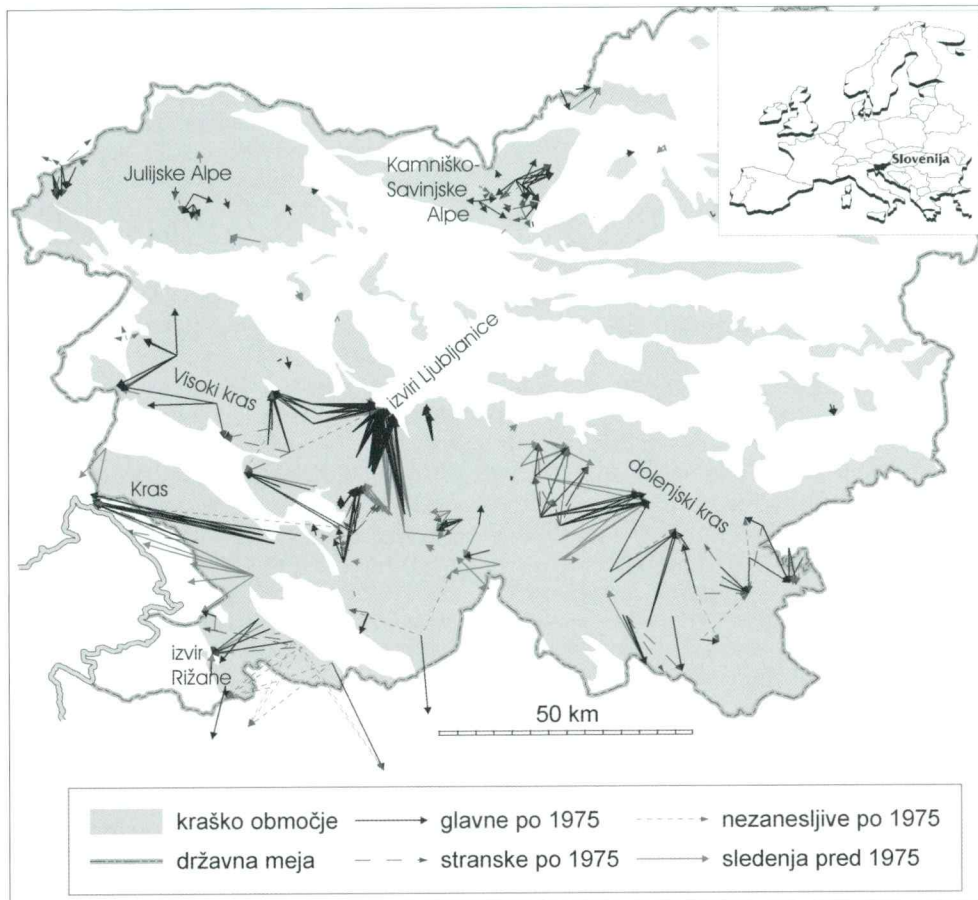
Reports on more than two hundred performed tracer tests with artificial tracers on karst areas in Slovenia have been published in national and international professional publications since the beginning of 20<sup>th</sup> century. Based on the review of collected data, the results of the tracer tests, which were carried out in the last twenty years, are briefly presented and supplemented with the citation of sources of obtained information. For the whole period of approximately one hundred years some common characteristics of the performed tracer tests are described. Gained experiences confirm that the method of tracing is an important research tool in studies of karst aquifers. It can be stated also that a detailed plan of tracer test should be prepared in advance in order to get valuable results.

### Uvod

Sledenje z umetnimi sledili je ena izmed raziskovalnih metod, ki so se še posebej dobro uveljavile na področju kraške hidrogeologije. V Sloveniji je v uporabi že več kot sto let in ostaja tudi danes pomembno orodje za razumevanje delovanja kraških vodonosnih sistemov. Čeprav se je skozi zgodovino metodologija spreminjala in razvijala, pa ostaja osnovna ideja sledenja enaka. Določeno snov s primernimi lastnostmi neposredno ali posredno vnesemo v vodni tok in potem opazujemo kje, kdaj in v kakšnih količinah se bo spet pojavila. Sledilni poskusi so se pokazali kot zelo uporabno orodje za ugotavljanje obsega prispevnih zaledij izvirov ter značilnosti podzemnega pretakanja vode in prenosa kontaminantov. Da bi pridobili informacije o podzemnih tokovih, so umetna sledila najprej uporabljali predvsem za ugotavljanje povezav med ponori in izviri. Z nadaljnjim razvojem pa je metoda postala širše upo-

rabna in načini njene uporabe še bolj inovativni. Verjetno najbolj celovit opis metode je pripravil KÄSS (1998).

Rezultati starejših sledilnih poskusov so ena izmed informacij, ki jih je pri pripravi hidrogeoloških raziskav na krasu potrebno poiskati že takoj v prvi fazi projekta. Možnost iskanja po ključnih besedah v elektronskih seznamih knjižnic je stvar sicer olajšala, a sta pregledovanje gradiva in pridobitev pravih podatkov vseeno precej zamudna procesa. Še težji je dostop do arhivov neobjavljenih poročil. Zato se je kot dobra rešitev pokazalo oblikovanje baze podatkov že opravljenih sledenj, ki vključuje osnovne podatke o poskusu, dobljene rezultate in vire pridobljenih informacij. Za starejša sledenja so bili osnovni viri podatkov že opravljeni pregledi sledenj, ki so bili objavljeni v strokovni literaturi. Tako je sledenja v prvi polovici 20. stoletja opisal ŠERKO (1946), rezultate za naslednji dve desetletji je pregledal GAMS (1965), novejša sledenja pa sta predstavila HABIČ (1989) in



Sl. 1. Podzemne vodne zveze na kraških območjih v Sloveniji, ki so bile ugotovljene s sledilnimi poskusi v letih med 1907 in 2008.

Fig. 1. Underground water connections on karst areas in Slovenia, proved by tracer tests in the years from 1907 to 2008.

NOVAK (1990). Za pridobitev dodatnih informacij je bilo potrebno najprej bolj podrobno pregledati citirano literaturo, potem pa še druga objavljena in neobjavljena dela z opisom rezultatov starejših in novejših sledenj. Ker je marsikatero neobjavljeno poročilo zelo težko dostopno v arhivih izvajalskih organizacij, v bazi ni podatkov o vseh sledenjih. Postavljena baza seveda ostaja odprta in jo je potrebno stalno dopolnjevati z novimi podatki.

V članku povzemam ugotovitve že objavljenih pregledov opravljenih sledenj, dopolnila pa sem jih s kratkim opisom rezultatov novejših sledenj med leti 1989 in 2008. Na sliki 1 so prikazane vse ugotovljene podzemne vodne zveze, v tekstu pa so predstavljene tudi osnovne značilnosti več kot dvesto sledilnih poskusov, ki so vključeni v bazo. Zaradi preglednosti na sliki niso označene lokacije posameznih sledenj, ampak le širša območja, za katera poimenovanje večinoma povzemam po GAMSU (2004). Tako z imenom kras alpskega visokogorja opisujem kraška območja v Julijskih in Kamniško-Savinjskih Alpah ter Karavankah. Kraško zaledje Ljubljance obsega območje kraških polj na Notranjskem, Javornika in Snežnika ter porečja Pivke. Dolenjski kras vključuje kraška območja v porečju Krke in Kolpe. Za območje Matičnega krasa v zaledju izvirov Timave uporabljam pokrajinsko ime Kras, ločeno pa obravnavam še zaledje izvira Ržane. Za kraška območja Trnovsko-Banjske planote in Nanosa po Janežu in sodelavcih povzemam ime Visoki kras (JANEŽ et al., 1997).

### Pregled opravljenih sledenj z umetnimi sledili na kraških območjih v Sloveniji

Objavljeni pregledi po posameznih obdobjih

Alfred ŠERKO (1946) je o sledenjih pred 2. svetovno vojno poročal v Geografskem vestniku. Poskusi so bili večinoma opravljeni v sklopu raziskav za različna hidrotehnična dela na krasu. Razdelil jih je v tri sklope glede na njihovo lokacijo, skupaj pa je v tabeli povzel rezultate 28 sledenj z navedbo izvajalca, lokacije in časa injiciranja, hidroloških pogojev, količine in tipa uporabljenega sledila ter dokazanih povezav z navideznimi hitrostmi podzemnega pretakanja.

Največ barvanj je bilo opravljenih v zaledju izvirov Ljubljance. Dokumentacija poskusov je zelo slaba in pogosto je podatke povzel na osnovi izjav izvajalcev. Šerko rezultate opisanih poskusov obravnava zelo kritično in ugotovljene povezave večinoma ocenjuje kot »nedokazane domneve«. Na koncu oceni, da so kljub pomanjkljivostim opravljenih poskusov glavne podzemne zveze v zaledju Ljubljance dokazane, za nekatere stranske pritoke in zveze pa predlaga barvanja na novih lokacijah oz. ponovitev sledenj, ki so dala nezanesljive rezultate. Za prihodnost omenja tudi možnost sledenja na Javornikih in Snežniku, ki so brez površinsko tekočih voda in poudari potrebo po uporabi velike količine barve v breznu, ki bi jo voda ob hudem deževju odplavila v podzemlje. Drugi sklop predstavljajo raziskave v porečju Krke. Kljub številnim barvanjem Šerko zaključí,

da so meje zaledij in podzemne vodne zveze še vedno neznane ali vsaj dvomljive. Predvsem izpostavlja potrebo po ugotovitvi, kako je z vodnim tokom ob Krki in ali Krka zateka v izvire nižje ob strugi ter na ta način vpliva na rezultate sledenj. Tretji sklop so barvanja na Tržaškem, ki so bila večinoma opravljena za hidrotehnični urad tržaške občine zaradi reševanja problemov vodooskrbe. Že ti starejši poskusi so dokaj dobro pojasnili značilnosti zaledja izvirov Timave in glavne smeri pretakanja podzemne vode v Krasu.

Zanimiv je Šerkov končni povzetek, da so bila takratna sledenja na območju današnje Slovenije usmerjena predvsem k določitvi pripadnosti neke ponikalnice določenemu porečju, ne pa k bolj podrobnemu opazovanju značilnosti podzemnega pretakanja, čeprav ustrezna interpretacija rezultatov sledenj omogoča tudi to.

Ponovno je o opravljenih sledenjih po letu 1945 pisal Ivan Gams v zborniku *Naše jame* (GAMS, 1965). Uporabil je podatke iz arhiva Hidrometeorološkega zavoda Slovenije, tudi v tem času pa so bile raziskave pretežno povezane s hidrotehničnimi načrti izgradnje akumulacij na krasu. Gams njihove rezultate uporabi za predstavitev splošnih značilnosti smeri pretakanja podzemne vode v Sloveniji in povezav znotraj najpomembnejših kraških območij. V tabeli povzema rezultate 23 sledenj z navedbo izvajalca, lokacije in časa injiciranja, hidroloških pogojev, količine in tipa uporabljenega sledila ter dokazanih povezav z navideznimi hitrostmi podzemnega pretakanja. Ne spušča pa se v podrobnosti in vrednotenje kakovosti rezultatov posameznih sledilnih poskusov.

Peter HABIČ (1989) je v *Geografskem vestniku* pripravil pregled sledenja kraških voda po letu 1965. Ta temelji na projektu Študija sledilnih metod v Sloveniji, ki sta ga za Zvezo vodnih skupnosti Slovenije v treh fazah izdelala Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU in Hidrometeorološki zavod Slovenije. V obdobju, ki ga opisuje, so bila sledenja večinoma opravljena z namenom ugotavljanja zaledij kraških vodnih virov in določanja varstvenih pasov. Omenjena so sledenja v predalpskem in alpskem krasu, več sledenj je bilo opravljenih v zaledjih Ljubljane, Timave in Rižane, s poskusi pa so ugotavljali tudi prispevno zaledje vodnih virov ob Krki in Kolpi. Kot pomembnejše dosežke sledenj v tem času navaja na različnih območjih dokazane bifurkacije med jadranskim in črnomořskim povodjem, pa tudi med posameznimi izviri znotraj istega povodja. V tabeli povzema v 92 poskusih ugotovljene podzemne vodne zveze med ponikalnicami in izviri ter navaja izvajalce poskusov. Rezultati so predstavljeni v pregledni karti pomembnejših kraških izvirov s pripadajočimi zaledji. Iz karte je razvidna razsežnost zaledij, ki bi jih bilo treba varovati, če bi hoteli zaščititi kraško vodno bogastvo.

Podobno obdobje kot Habič je obravnaval tudi Dušan NOVAK (1990), ki je v *Geologiji* objavil podatke o 57 sledenjih med leti 1959 in 1988. V tabeli povzema rezultate z navedbo izvajalca, lokacije in časa injiciranja, hidroloških pogojev, tipa uporabljenega sledila ter dokazanih povezav z na-

videznimi hitrostmi podzemnega pretakanja. Že v izveščku napiše, da so bila sledenja opravljena predvsem za praktične potrebe vodnega gospodarstva in oskrbe z vodo. Povzema rezultate poskusov, ki jih je opravil Geološki zavod Ljubljana in jih dopolni s podatki o nekaterih drugih poskusih, ki so bili objavljeni v strokovni periodiki. Navaja, da so opravljena sledenja omogočila določitev poteka kraških razvodnic med porečji in med zaledji posameznih izvirov, ki so zajeti za oskrbo z vodo ali pa so za ta namen primerni. Rezultate pa je bilo možno uporabiti tudi za oceno stopnje ogroženosti podzemne vode zaradi onesnaženja in izdelavo predloga potrebnih varstvenih ukrepov.

Znotraj obdobja, ki ga obravnavata zadnja dva opisana pregleda, je potrebno posebej izpostaviti raziskave pod okriljem mednarodnega združenja za sledilno hidrologijo Association of Tracer Hydrology (ATH). Prvi simpozij o sledenju voda je bil organiziran že leta 1966, potem pa je bila priprava tretjega simpozija 3. SWT v letu 1976 zaupana slovenskim raziskovalcem. Pred tem so skupaj s strokovnjaki ATH iz drugih držav v triletnem obdobju izpeljali skupni raziskovalni projekt na izbranem študijskem poligonu na območju kraškega zaledja Ljubljane. Zasnovana je bila celovita študija z obsežnimi prehodnimi raziskavami z uporabo različnih raziskovalnih metod, potem pa izvedeno še kombinirano sledenje z istočasnim injiciranjem različnih sledil v 12 ponikalnicah znotraj sistema. Rezultati so bili objavljeni v posebni publikaciji (GOSPODARIČ & HABIČ, 1976) in so pomembno prispevali k poznavanju hidrogeoloških značilnosti obravnavanega območja, še pomembnejši pa je doprinos opravljenih raziskav k razvoju metodologije sledenja. Slovenski raziskovalci so bili vključeni v ATH projekte tudi drugod po Evropi. Tovrstno sodelovanje jim je prineslo veliko koristi, saj jim je olajšalo spremljanje razvoja metodologije sledenja v svetu, omogočalo pa tudi aktivno sodelovanje v tem procesu.

Vsi zgoraj opisani pregledi opravljenih sledenj so z navedbo virov, po katerih so povzeti rezultati, zelo pomemben pripomoček pri iskanju informacij o ugotovljenih značilnostih podzemnega pretakanja na različnih kraških območjih v Sloveniji. V nadaljevanju so na podoben način predstavljena tudi novejša sledenja med leti 1989 in 2008.

### Novejša sledenja v obdobju med 1989 in 2008

V okviru raziskav za vodooskrbo Bele Krajine je Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU spomladi 1989 opravil drugi sklop kombiniranih sledilnih poskusov v zaledju izvira Dobličice (HABIČ ET AL., 1990) in v letih 1990 in 1991 štiri sledenja v zaledju izvira Krupe (HABIČ & KOGOVŠEK, 1992). Proti Dobličici je odtekala voda iz Miklarjevega zdenca, proti Krupi pa iz ponikalnic Rečica pri Vrčicah in v Bajerju (obe sledenji z bakteriofagi so izvedli sodelavci Nacionalnega inštituta za biologijo iz Ljubljane), iz Ponikev na Mirni gori, z območja Rožnega dela in Malinske Drage. Za posamezne izmed zadnjih treh lokacij je bilo ugo-

tovljeno tudi odtekanje proti izviru ob Čermošnjici pri Kočevskih Poljanah, proti Sušici oz. Obrhu pri Metliki. Iz ponikalnice Reka v Ponikvah na Gorjancih pa podzemne vode tečejo proti Krupi, Obrhu pri Metliki in izviru Težke vode nad Novim mestom. Opisane raziskave na območju Bele Krajine so pokazale na obstoj široke bifurkacijske cone, ki napaja več izvirov v porečju Krke in Kolpe. Pri raziskavah zaledja izvira Šumetac ob Kolpi sta bili dokazani povezavi s požiralnikom v Jamah in potokom Knežja Lipa (NOVAK & ROGELJ, 1993).

Na območju Kamniško-Savinjskih Alp je Geološki zavod Ljubljana v letih 1990-1994 opravil serijo 11 sledenj z različnimi točkami injiciranja na Veliki in Mali planini (NOVAK, 1996). Ob vznožju planine so na vseh straneh številni izviri, mnogi od njih so zajeti tudi za vodooskrbo. Rezultati sledenja so pripomogli k boljšemu razumevanju značilnosti pretakanja znotraj kraškega masiva in bolj natančni omejitvi zaledja posameznih izvirov. Dokazani so bili značilni pojavi bifurkacije z raztekanjem podzemne vode proti različnim izvirov.

Na območju Julijskih Alp je bilo v tem obdobju opravljenih več sledenj, ki pa so bila večinoma omejena na ožja območja. Italijani poročajo o dveh sledenjih na Kaninu, avgusta 1991 v Črnelsem breznu (ANTONINI & SQUASSINO, 1992) in oktobra 1997 v breznu Led Zeppelin (CUCCHI et al., 1997). Ugotovljena je bila glavna smer odtekanja proti izviru Glijun, stranska pa proti izviroma Žvika in Možnica. V drugem sledenju je bila nakazana tudi možnost povezave z Boko in nekaterimi izviri v Italiji. V juliju 1996 je Hidrometeorološki zavod Slovenije v okviru raziskav vodne bilance izvedel dve sledenji na območju Bohinja (TRIŠIČ et al., 1997). S Planine v Lazu je rodamin odtekal v izvira Savice in Snedčice, s Planine pri jezeru pa v izvir Savice ter Govic in druge manjše izvire ob Bohinjskem jezeru. Brancelj in Urbanc sta z uporabo uranina ugotovila, da se vode iz Jezera v Ledvici v Dolini sedmerih triglavskih jezer odtekajo pretežno proti izviru Močivec (BRANCELJ & URBANC, 2000).

V letih 1993-1995 je bil študijski poligon skupnega projekta združenja ATH, v katerega je bilo vključenih več kot petdeset raziskovalcev iz 16 organizacij iz Nemčije, Avstrije in Slovenije, spet v Sloveniji (KRANJC, 1997). Na območju Visokega krasa so bile v tem obdobju opravljene obsežne meteorološke, hidrološke, geomorfološke, speleološke, geološke in hidrogeološke raziskave ter hidrokemične in izotopske analize, ki so služile kot osnova za izvedbo 4 kombiniranih sledilnih poskusov ob različnih hidroloških pogojih. Študija je pokazala na prepletanje zaledij izvirov ob vznožju kraške planote. Iz Belega brezna pod Golaki voda odteka proti izviroma Mrzlek in Lijak, v manjšem deležu pa proti Hublju. V njegovem neposrednem zaledju je vrtača Zavrhovc. Proti Podroteji in Divjem jezeru tečejo vode z območja Mrzlega loga nad Črnim vrhom in Malega polja pri Colu. V izviru Vipave se je pojavilo sledilo iz ponora Lokve pri Predjami in brezna Slapenski

ledenik na Nanosu. Zbrane ugotovitve so pripomogle k izboljšanju razumevanja značilnosti pretakanja vode in prenosa snovi znotraj pomembnega vodonosnika in so tako dobra podlaga za načrtovanje njegove ustrezne zaščite. Pomemben pa je tudi prispevek projekta k razvoju metodologije, saj so bile v kombiniranih sledilnih poskusih z uporabo različnih sledil testirane njihove značilnosti in primernost.

Na Inštitutu za raziskovanje krasa smo v zadnjih desetih letih izvedli kar nekaj študij, pri katerih so bili sledilni poskusi uporabljeni kot orodje za oceno negativnih vplivov različnih virov onesnaževanja na podzemne kraške vode. Tako smo s slednjem v juniju 1997 ugotovili glavno smer odtekanja z območja vojaškega vadišča Poček pri Postojni proti izviru Malenščice na Planinskem polju, pa tudi proti izviru Vipave (KOGOVŠEK, 1999). Skupaj smo v teh dveh izviri zaznali kar 81 % injiciranega sledila. Le manjši del sledila pa se je pojavil v drugih izviri na Planinskem polju in v Rakovem Škocjanu, zato povezavo z njimi opisujemo kot slabšo ali stransko. Za Zavod Republike Slovenije za blagovne rezerve smo leta 2000 ocenili nevarnost ob iztekanju škodljivih snovi iz skladišča naftnih derivatov v Ortneku pri Ribnici. S tega območja odteka ponikalnica Tržiščica predvsem proti izviru ob Krki pri Dvoru, le deloma pa proti Podpeški jami na Dobropolju (KOGOVŠEK & PETRIČ, 2002). Spomladi 2001 smo izdelali oceno vpliva načrtovane gradnje železniške proge Divača-Koper na podzemne vode. Uranin smo injicirali v Jamo s slapom pri Ocizli in ugotovili glavno smer odtekanja proti izviru Boljunec v Italiji, le v majhnih koncentracijah pa se je sledilo pojavilo tudi v izviru Rižane, ki je zajet za vodooskrbo treh obalnih občin (KOGOVŠEK & PETRIČ, 2004). V sklopu izdelave hidrogeoloških podlag za načrtovanje monitoringa vpliva odlagališč odpadkov na podzemne vode smo izvedli tri sledilne poskuse. Z odlagališča Mala gora pri Ribnici odtekajo vode primarno proti izviru ob Krki v okolici Dvora, slabša pa je povezava z izviri na Dobropolju (KOGOVŠEK & PETRIČ, 2006). Le v nizkih koncentracijah pa smo sledilo ob visokem vodostaju zaznali tudi v izviru Globočec, ki je zajet za vodooskrbo tega območja. Z odlagališča pri Sežani je skoraj 93 % injiciranega uranina odteklo skozi izvire Timave v Tržaškem zalivu, v manjših koncentracijah pa se je pojavilo tudi v bližnjem izviru Sardoč in Brojnici pri Nabrežini (KOGOVŠEK & PETRIČ, 2007). Stalna povezava s črpališčem Klariči, iz katerega se z vodo oskrbuje 5 kraških občin, ni bila ugotovljena. Malenkostno povečane koncentracije uranina, ki so se tam pojavile ob zelo visokem vodostaju, bi sicer lahko pomenile možnost občasnega stekanja tudi v tej smeri, lahko pa so bile le odraz naravnega iztoka onesnaženja iz kraškega vodonosnika. Tretji podoben primer je odlagališče odpadkov Mozelj pri Kočevju, kjer smo z uporabo dveh različnih fluorescenčnih barvil ugotavljali smeri in značilnosti odtekanja vode, hkrati pa preverjali tudi primerčnost treh vrtin, ki so bile na območju odlagališča izvrtane z namenom izvajanja monitoringa vpliva

odlagališča na kakovost podzemne vode. Rezultate smo predstavili v internem poročilu za naročnika (PREGL ET AL., 2006), trenutno pa jih pripravljamo za objavo. V vseh treh primerih odlagališč so bili rezultati sledilnega poskusa uporabljeni kot osnova za izdelavo načrta monitoringa vpliva na kakovost podzemnih vod. Izbrali smo najbolj primerne točke monitoringa, glede na ugotovljene značilnosti podzemnega pretakanja pa izdelali tudi predlog časovne razporeditve in pogostnosti vzorčenja, ki ga je potrebno ustrezno prilagoditi hidrološkim razmeram. Sledilni poskus smo uporabili tudi pri oceni možnega vpliva iztoka iz čistilne naprave pri Fari na Bloški planoti na Križno jamo. Ob srednjem vodostaju pozimi 2007–2008 je bila ugotovljena glavna smer odtekanja proti izviru Štebersčice ob Cerkniškem polju, pa tudi proti Žerovniščici in izviru v Podložu, precej manjše koncentracije pa so bile zaznane v Križni jami in Križni jami 2 (KOGOVŠEK ET AL., 2008).

Zgoraj omenjena sledenja, pri katerih smo sledilo injicirali na površje, so prinesla nova spoznanja o značilnostih pretakanja skozi vadozno cono kraškega vodonosnika. Pokazalo se je, da del vode in v njej raztopljenega sledila odteče hitro po primarnih drenažnih poteh, ostanek pa se dalj časa zadrži v slabše prepustnih conah in ga šele novo infiltrirana voda po kasnejših intenzivnejših padavinskih dogodkih iztisne iz sistema. Janja Kogovšek pa značilnosti vadozne cone že dalj časa proučuje tudi na študijskem poligonu v Postojnski jami. V sklopu podrobnih in dolgotrajnih raziskav je izvedla tri sledilne poskuse, s katerimi je ugotovila razlike v prenosu snovi po različnih tokovnih poteh in potrdila dolgotrajnost spiranja sledila iz kraškega sistema (KOGOVŠEK, 1997; KOGOVŠEK, 2000).

Z nadaljevanjem sodelovanja v okviru združenja ATH so povezana sledenja na študijskem poligonu Sinji vrh na Trnovski planoti. Pod vodstvom Inštituta za rudarstvo, geotehnologijo in okolje je bilo z uporabo različnih sledil izvedenih več kombiniranih sledilnih poskusov, s katerimi so bile proučevane značilnosti zgornjega dela vadozne cone (ČENČUR CURK ET AL., 2001; BRICELJ & ČENČUR CURK, 2005).

S sledenjem vodnega toka v jami Ferranova buža pri Vrhniki je bilo ugotovljeno, da se je večina injiciranega uranina pojavila v Kožuhovem izviru, manj pa v Primcovem studencu in Bečajem izviru (STAUT & AUERSPERGER, 2006).

Sledenja z umetnimi sledili so se pokazala kot primerna metoda tudi za validacijo kart ranljivosti. Za zaledje izvira Podstenjšek pri Ilirski Bistrici sta bila za testiranje te karte izvedena dva kombinirana sledilna poskusa z injiciranjem sledil na lokacijah, za katere so bile določene različne stopnje ranljivosti (RAVBAR, 2007). Ustreznost določitve teh stopenj je bila ocenjena glede na čas do pojava sledila in delež povrnjenega sledila.

Samo omenim pa naj dve sledenji bolj lokalnega pomena, ki sta dokazali povezavo ponora Črmelice z izvirom Korentan pri Postojni (SCHULTE, 1994) in Lukovškega potoka z izvirom Zijalo ob Temenici na Dolenjskem (NOVAK, 1994). Do-

bila sem tudi informacije o sledenju z uraninom v Črnodraginem breznu na Snežniku, ki sta ga v sklopu skupne slovensko-hrvaške raziskave na območju med Tržaškim in Kvarnerskim zalivom izvedla Geološka zavoda Slovenije in Hrvaške. Kot zanesljivo so določili podzemno vodno zvezo z izviro Riječina in Zvir na Hrvaškem (PRESTOR ET AL., 2004). V časopisu Delo pa sem zasledila kratko informacijo o sledenju ponikalnice v Retjah v Loškem potoku, ki ga je v septembru 2005 izvedlo podjetje Geologija d.o.o. iz Idrije (FAJFAR, 2006). Dokazana je bila povezava z izvirom Veliki Obrh na Loškem polju, v izviri pri Ribnici pa se injicirani uranin ni pojavil. Za zadnja dva omenjena poskusa v strokovni periodiki nisem zasledila prispevkov, ki bi povzemali njihove rezultate. Zelo verjetno je, da je takih primerov v celotnem obravnavanem obdobju še več.

### Značilnosti opisanih sledenj

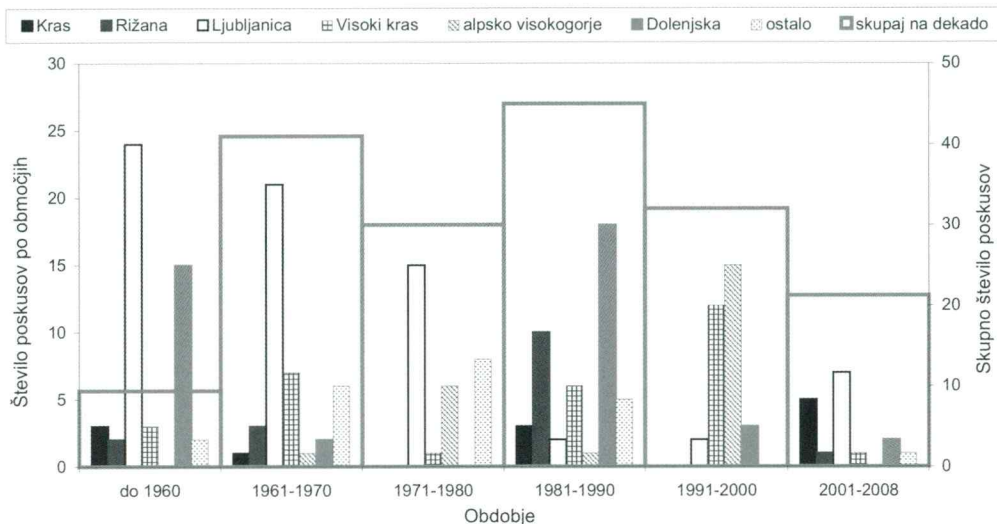
Časovna in prostorska razporeditev opravljenih sledenj

Iz zbranih podatkov je razvidno, da je bilo že pred 1. svetovno vojno na tleh današnje Slovenije opravljenih 14 sledenj na krasu. Prvo zabeleženo je sledenje G. Timeusa, ki je 23. decembra 1907 v ponor Reke injiciral uranin in litijev klorid ter ugotovil podzemno vodno povezavo z izviri Timave, Brojnico pri Nabrežini in še dvema manjšima izviroma v bližini Trsta (TIMEUS, 1928). Do leta 1941 je bilo opravljenih še 20 sledenj, nato pa v naslednjih dvajsetih letih le 15 poskusov. Skupaj je bilo tako do leta 1960 izvedenih 49 sledenj, kar v povprečju pomeni nekaj več kot 9 na desetletje (slika 2). Skoraj polovica poskusov je bila opravljena v kraškem zaledju Ljubljane, nekaj več kot tretjina pa na dolenjskem krasu.

V naslednjem desetletju je skupno število poskusov močno naraslo. Od skupaj 41 sledenj jih je bilo več kot polovica opravljenih v območju kraške Ljubljane. Razlog so verjetno raziskave povezane z energetskega načrta na tem območju in študije za reševanje problemov vodooskrbe na območju Postojne in Pivke. Omenim naj tudi prvi sledilni poskus v krasu alpskega visokogorja, ki ga je z barvanjem v Triglavskem breznu v avgustu 1964 opravil I. GAMS (1966).

Kljub projektu 3. SWT je bilo v obdobju 1971–1980 skupno opravljenih le 30 sledenj, spet polovica v zaledju Ljubljane, kjer so potekale tudi raziskave omenjenega projekta. Najbolj aktivno je bilo s 45 poskusi naslednje desetletje, ko so zaradi intenzivnih raziskav za vodooskrbo prevladovala sledenja na območju Dolenjske in Bele Krajine ter v zaledju izvira Rižane.

V obdobju 1991–2000 je bilo sledenj spet manj, zanimivo pa je, da jih je bilo največ izvedenih na območju krasa alpskega visokogorja. Razlog je obsežna raziskava, ki jo je v začetku devetdesetih let na Veliki in Mali planini opravil Geološki zavod Ljubljana. Drugo težišče pa je bilo območje Visokega krasa kot študijski poligon mednarodnega projekta 7. SWT.



Sl. 2. Časovna in prostorska razporeditev pregledanih sledilnih poskusov (za prvo in zadnje obdobje skupno število poskusov izračunano kot povprečje za obdobje 10 let).

Fig. 2. Distribution of reviewed tracer tests in time and space (for the first and the last period the total number of tests calculated as an average for 10 years).

V zadnjih osmih letih do 2008 so bila sledenja še bolj redka, spet pa sta bili vodilni študijski območji Kras in zaledje izvirov Ljubljane. Večino raziskav smo opravili na Inštitutu za raziskovanje krasa. Seveda obstaja verjetnost, da je bilo izvedenih še več sledenj, ker pa njihovi rezultati niso bili objavljeni, v ta pregled niso vključeni.

Skozi celotno obdobje je bilo največ sledenj opravljenih na območju kraške Ljubljane, nekaj manj pa na območju dolenjskega krasa in Visokega krasa.

#### Namen sledilnih poskusov in njihovi izvajalci

Skozi zgodovino so se spreminjali tako namen kot naročniki sledenja. Glavni cilj ostaja ugotovitev smeri podzemnega pretakanja, predvsem določitev povezav med ponori in izviri, pa tudi omejitve prispevnih zaledij izvirov. Posamezni projekti so bili usmerjeni v reševanje specifičnih problemov, npr. v iskanje določenih virov onesnaženja ali dotokov vode v podzemne rove ali jame in za oceno vplivov gradbenih del ali že obstoječih objektov na vodne vire. Pomembna naloga je določitev in spremljanje negativnih vplivov različnih virov onesnaženja (kot so odlagališča odpadkov, kanalizacijski sistemi, skladišča naftnih derivatov ali vojaška vadišča) na podzemne vode, rezultati pa se uporabljajo kot strokovna podlaga za izdelavo načrta monitoringa kakovosti voda v njihovem vplivnem območju. V preteklosti so bila sledenja financirana iz različnih državnih, regionalnih ali lokalnih investicijskih ali raziskovalnih skladov, v zadnjem času pa so investitorji pogosto tudi vodovodna, komunalna in cestna podjetja, občinske ter rudniške uprave in podobno.

Pred letom 1960 so se s sledenjem ukvarjali različni raziskovalci, ki so skupaj izvedli 35 poskusov. Po letu 1950 se kot izvajalska organizacija najprej redno pojavlja Hidrometeorološki zavod Slovenije, od 60-ih let naprej pa še Geološki zavod Ljubljana in predvsem Inštitut za raziskovanje krasa iz Postojne. V novejšem času so metodo sledenja z bakteriofagi razvijali na Nacionalnem inštitutu za biologijo v Ljubljani. Manjše število sledenj so opravile še nekatere druge organiza-

cije. Večkrat so pri sledenjih sodelovali tudi raziskovalci iz tujine, predvsem pod okriljem mednarodnega združenja za sledilo hidrologijo ATH.

#### Točke injiciranja

Razvoj ideje sledenja je v tesni zvezi s ponikanjem površinskih tokov v podzemlje in s tem povezanimi vprašanji, kam te vode odteka in kje se spet vračajo na površje. V veliki večini poskusov je bilo tako sledilo injicirano v ponikalnico in v preteklosti je bil drugačen način vnosa sledila izbran le izjemoma.

Predvsem v zadnjih letih pa se sledilni poskusi vedno bolj uveljavljajo kot primerna metoda za študij značilnosti toka vode in prenosa snovi v vadozni coni. Zanimive rezultate so dala sledenje v krasu alpskega visokogorja brez površinsko tekočih voda, kjer so bila sledila injicirana v brezna v curke prenikajoče vode precej nad nivojem podzemne vode ali pa na površje v iztoke iz umetnih zbiralnikov vode (GAMS, 1966; NOVAK, 1996). Tudi na območju Visokega krasa so površinski tokovi redki in kot točke injiciranja so bili izbrani vrtače in brezna (KRANJC, 1997).

Ena izmed trenutno zelo aktualnih metod so raziskave na območju manjših študijskih poligonov. Nad opazovanim rovom v Postojnski jami sta bili sledili hkrati injicirani na površje in v dnu izkopane ponikovalnice 4 m pod površjem (KOGOVŠEK, 2000). Na poligonu na Sinjem vrhu pa so različna sledila injicirali na površju in v plitve vrtnine v tleh, na stik tal in kamnine ter v razpokano kamnino, vzorčili pa različne curke v umetnem tunelu 5 do 25 m pod površjem (ČENČUR CURK ET AL., 2001). Na ta način so opazovali in primerjali različne poti in zadrževalne čase znotraj epikraške cone.

V zadnjih letih smo več sledilnih poskusov izvedli v sklopu projektov za oceno vpliva različnih virov onesnaženja s površja (npr. odlagališča odpadkov, skladišča naftnih derivatov, vojaški poligon, gradnja prometnic, iztok iz čistilnih naprav) na podzemne vode (KOGOVŠEK, 1999; KOGOVŠEK & PETRIČ, 2004; KOGOVŠEK & PETRIČ, 2006; KOGOVŠEK & PETRIČ, 2007). Z namenom simulacije dejanskih

pogojev je bilo sledilo injicirano v dobro prepustne razpoke na površju, kar je omogočalo študij vpliva vadozne cone na značilnosti podzemnega pretakanja in transporta v vodi topnih snovi.

### Uporabljena sledila

Najbolj pogosto pri sledilnih poskusih uporabljamo fluorescentna barvila. To so organske snovi, ki se zaradi absorpcije svetlobe iz UV dela spektra vzbudijo na molekularnem nivoju in nato oddajajo svetlobo v območju daljših valovnih dolžin (KASS, 1998). Ker so dobro topne v vodi, relativno konzervativne, stabilne z ozirom na kemijo voda, dobro zaznavne tudi v nižjih koncentracijah in nimajo škodljivega vpliva na kakovost voda, so zelo primerno sledilo, obstajajo pa seveda določene razlike med posameznimi tipi. Uporabljena so bila v 80 % pregledanih sledenj na kraških območjih v Sloveniji, kar v 64 % uranin (ali z drugim imenom natrijev fluorescein) kot najbolj primerno sledilo v tej skupini. V manjši meri so v rabi druge vrste sledil, predvsem soli 9 %, bakteriofagi 5 % in obarvani trosi 2 %. Ta druga sledila so se največkrat uporabljala pri kombiniranih poskusih, kadar je bilo hkrati injiciranih več različnih sledil. Še posebej to velja za projekte pod okriljem ATH, ki so imeli za enega izmed glavnih ciljev prav testiranje različnih sledil in njihovo medsebojno primerljivost. Tako so v 3. SWT (GOSPODARIČ & HABIČ, 1976) v enem kombiniranem sledilnem poskusu uporabili 14 različnih sledil (uranin, eozin, rodamin, amidorodamin, tinopal, detergenti, litijev in kalijev klorid, Cr-51, indij, trosi v 4 različnih barvah). Večina vključenih raziskovalcev je že imela veliko izkušenj s fluorescenčnimi sledili, optično belilo tinopal pa so uporabili prvič. Prvikrat v Sloveniji je bil v rabi tudi spektralni fluorometer, ki je omogočal detekcijo teh sledil tudi v nižjih koncentracijah. Pokazale so se določene težave pri zaznavanju zaradi interakcije med fluorescenčnimi barvili, zato je bilo potrebno vzorce predhodno kemično obdelati. Kloridi, detergentski in Cr-51 so bili ocenjeni kot manj uporabna sledila.

V aprilu 1985 so bili prvič na krasu v Sloveniji uporabljeni bakteriofagi. To so bakterijski virusi, ki se lahko razmnožujejo le v bakterijskih celicah, izven njih pa so inertni organizmi, ki lahko preživijo brez večjih škodljivih posledic daljše obdobje v okolju. Zato so bili ob ustreznih predpripravi uporabljeni kot sledilno sredstvo. Poskus je vodil Mihael Bricelj z Nacionalnega inštituta za biologijo, potekal pa je v sklopu raziskav za zaščito izvira Rižane (KRIVIC ET AL., 1987). To sledilo so v različnih kombinacijah kasneje uporabili še nekajkrat.

Primernost različnih sledil so spet preskušali v sklopu projekta 7. SWT. Injicirano je bilo sicer le 5 sledil (uranin, piranin, stroncijev in litijev klorid, bakteriofagi), a pri različnih hidroloških pogojih (KRANJC, 1997). Spet več sledil so uporabili pri raziskavah na testnem poligonu Sinji vrh (ČENČUR CURK ET AL., 2001; BRICELJ & ČENČUR CURK,

2005). Z namenom podrobne študije značilnosti toka v zgornji vadozni coni so pri prvem poskusu injicirali mešanico 6 sledil ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{MnCl}_2$ ,  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , uranin), pri drugem pa še mešanico 11 sledil (fluorescentna barvila, soli, devterij, mikrozrna, bakteriofagi).

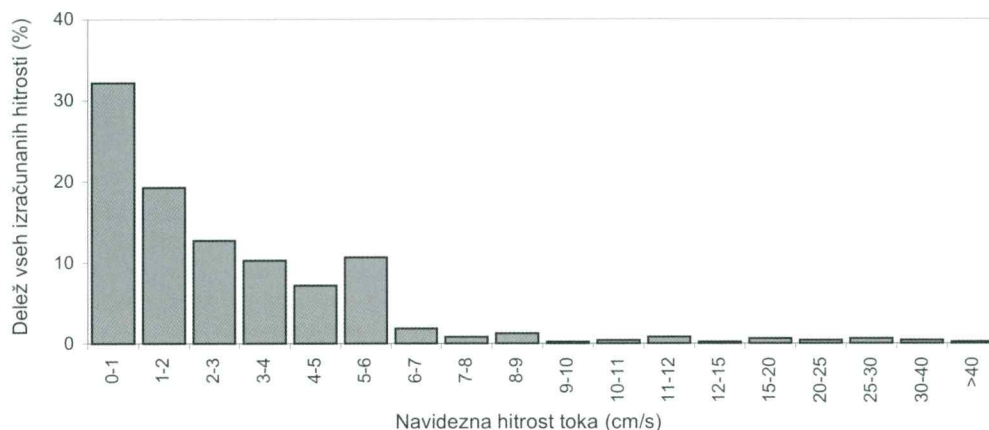
Količina uporabljenega sledila se bistveno razlikuje glede na tip sledila, za isto sledilo pa glede na hidrološke razmere in velikost izvirov, v katerih naj bi se po predhodnih ocenah pojavilo. Z razvojem novih naprav za detekcijo, ki danes omogočajo zaznavanje že pri zelo nizkih in prostemu očesu seveda nevidnih koncentracijah, se je zmanjšala tudi količina uporabljenega sledila. Tako je na prej omenjenih študijskih poligonih zadoščalo že nekaj gramov uranina, v zaledju večjih kraških izvirov pa ga je še vedno potrebno injicirati tudi več deset kilogramov. Po zbranih podatkih je bilo največ uranina uporabljenega pri sledenju Reke v juliju 1962 (100 kg; MOSETTI, 1965), v zadnjih letih pa prav tako v zaledju izvirov Timave na odlagališču odpadkov pri Sežani v aprilu 2005 (38 kg; KOGOVŠEK & PETRIČ, 2007).

### Trajanje poskusa

V poročilih, ki opisujejo prve sledilne poskuse na Slovenskem krasu, informacija o trajanju vzorčenja običajno manjka. Za nekatera poznejša je bilo zapisano, da traja od nekaj dni do nekaj tednov, običajno samo v času, ko je bil zabeležen prvi sledilni val na zajemnem mestu. Daljša vzorčenja v trajanju do 4 mesecev so bila organizirana pri sledenjih v zaledju Rižane v letih 1985 in 1987 (KRIVIC ET AL., 1989), do pol leta pa v projektu 7. SWT. Le pri nekaterih poskusih v zadnjih letih je bilo to obdobje tudi daljše od enega leta, ko smo z vzorčenjem nadaljevali še po ugotovljenem prvem sledilnem valu (KOGOVŠEK & PETRIČ, 2004; KOGOVŠEK & PETRIČ, 2006). Rezultati so pokazali, da lahko le z uporabo dolgotrajnih poskusov zaznamo tudi tokovne poti, ki se aktivirajo le ob bolj izrednih hidroloških pogojih. Z dalj časa trajajočimi sledilnimi poskusi pa je bilo ugotovljeno tudi dolgotrajno spiranje sledila in po analogiji tudi morebitnega onesnaženja iz kraškega vodosnega sistema.

### Ugotovljene navidezne hitrosti in delež povrnjenega sledila

Najpomembnejša informacija, ki jo dajo sledilni poskusi, je smer podzemnega pretakanja, eden izmed iskanih rezultatov pa je tudi izračun navidezne hitrosti pretakanja na osnovi primerjave med zračno razdaljo od točke injiciranja do točke pojava sledila in časom med trenutkom injiciranja in pojavom sledila. Pri tem ločimo med maksimalno hitrostjo (glede na prvi pojav sledila) in dominantno hitrost (glede na maksimalno zabeleženo koncentracijo sledila). Predvsem v poročilih o starejših poskusih pogosto ni povsem jasno, kateri izmed obeh parametrov je podan. Še posebej



Sl. 3. Razporeditev izračunanih navideznih hitrosti podzemnega pretakanja  
Fig. 3. Distribution of calculated apparent groundwater flow velocities

to velja za najstarejše poskuse, ko ni bila določena celotna krivulja pojavljanja sledila, ampak je bilo vzorčenje omejeno na potrditev povezave.

Poleg tega so ugotovljene navidezne hitrosti zelo odvisne od hidroloških pogojev in neposredna primerjava med njimi ni možna. Vsaj za okvirno oceno pa sem (brez dodatnega preverjanja) pri vseh pregledanih poskusih ugotovljene hitrosti primerjala in razvrstila v razrede prikazane na sliki 3. Kjer je bila izbira možna, sem upoštevala navidezno dominantno hitrost. Pri približno tretjini poskusov je bila ugotovljena hitrost manjša od 1 cm/s ali 36 m/h, delež poskusov z višjimi hitrostmi pa se potem postopno manjša. V prvi razred pade večina poskusov, pri katerih je bilo sledilo injicirano na površje. So pa bile tudi pri tovrstni poskusih ob visokem vodostaju in injiciranju v dobro prepustne razpoke ugotovljene hitrosti okrog 4 cm/s ali 144 m/h (KOGOVŠEK & PETRIČ, 2006). Hitrosti višje od 10 cm/s ali 360 m/h so značilne za sledenja večjih ponikalnic s krajšim podzemnim tokom ob visokih vodostajih.

### Sklepi

Sledilni poskusi se zelo razlikujejo po svojem osnovnem namenu, pristopu in natančnosti izvedbe ter tehničnih možnostih v času sledenja. Predvsem pri starejših poskusih je težko oceniti kakovost izvedbe, gotovo pa so bile slabše tehnične možnosti, saj niso razpolagali z napravami za natančno določevanje nižjih koncentracij. Zato je potrebno dobljene rezultate privzemati z določeno mero kritičnosti, v nekaterih primerih pa tudi preveriti z novim sledenjem. Vseeno pa pomenijo rezultati starejših sledenj pomembno osnovo za oceno hidrogeoloških značilnosti in načrtovanje novih raziskav.

Na osnovi pozitivnih izkušenj, ki so bile pridobljene predvsem z uspešnimi raziskovalnimi projekti kombiniranih sledenj, pa tudi negativnih izkušenj z nekaterimi slabše načrtovanimi poskusi, lahko zaključimo, da so predhodne, interdiscipli-

narne raziskave (meteorološke, hidrološke, geološke, geomorfološke, speleološke, hidrokemične, biološke, itd) študijskega območja bistvenega pomena za uspešno izvedbo sledilnega poskusa. Na osnovi dobljenih rezultatov potem izberemo najbolj primeren tip sledila in glede na pričakovane smeri odtekanja vode in pričakovane hidrološke razmere ocenimo potrebno količino. Ugotovljene značilnosti upoštevamo tudi pri pripravi natančnega programa sledenja z načrtom izvedbe injiciranja in vzorčenja, ki pa ga potem med samim poskusom sproti prilagajamo hidrološkim razmeram in rezultatom sprotne analize koncentracij sledila v vzorcih. Za pridobitev čim bolj celovite informacije je potrebno z vzorčenjem nadaljevati še daljši čas po zabeleženju prvega sledilnega vala. Za oceno količine povrnjenega sledila je potrebno vzpostaviti tudi merjenje pretoka opazovanih izvirov.

V preteklosti je najboljše rezultate dala uporaba fluorescenčnih sledil, predvsem uranina, podobna razmerja pa pričakujemo tudi v prihodnje. Z večanjem pomena kombiniranih sledenj pa so večje tudi potrebe po uvajanju in preskušanju novih sledil.

Ker je izvedba sledilnih poskusov povezana tudi z relativno visokimi stroški, je pomembno, da jih čim bolj natančno načrtujemo in s tem zagotovimo čim boljše kakovost dobljenih rezultatov. Zelo pomembno je sproti objavljati rezultate v strokovnih publikacijah, saj se na ta način lahko izognemo nepotrebnemu ponavljanju ali časovnemu in prostorskemu prekrivanju raziskav, novi izsledki pa so lahko koristna informacija za vse, ki se lotevajo raziskovanja kraških vodonosnih sistemov ali pa načrtujejo upravljanje z njimi. Po naših izkušnjah se z objavo rezultatov običajno strinjajo tudi naročniki projektov.

Seveda so sledilni poskusi z umetnimi sledili le eno izmed orodij za raziskovanje kraških vodonosnih sistemov in jih je potrebno za razumevanje heterogene zgradbe in kompleksnega delovanja teh sistemov uporabljati vzporedno in v povezavi z drugimi raziskovalnimi metodami.

## Literatura

- ANTONINI, R. & SQUASSINO, P. 1992: Fenomeni carsici di Planina Goricica. Alpine caves: alpine karst systems and their environmental context (Asiago): 33–39.
- BRANCELJ, A. & URBANC, J. 2000: Karst ground-water connections in the valley of the Seven Triglav Lakes. *Acta carsologica* (Ljubljana) 29/1: 47–54.
- BRICELJ, M. & ČENČUR CURK, B. 2005: Bacteriophage transport in the unsaturated zone of karstified limestone aquifers. In: STEVANOVIĆ, Z. & MILANOVIĆ, P.T. (eds.): Water resources and environmental problems in karst: proceedings of the International conference and field seminars, Belgrade and Kotor / Serbia and Montenegro / 13–19 September 2005. Institute of Hydrogeology, Faculty of Mining and Geology (Belgrade): 109–114.
- ČENČUR CURK, B., TRČEK, B. & VESELIČ, M. 2001: The study of solute transport with natural and artificial tracers at experimental field site Sinji Vrh. RMZ-Mater. Geoenviron. (Ljubljana) 48/3: 401–413.
- CUCCHI, F., GEMITI, F., MANCA, P. & SEMERARO, R. 1997: Underground water tracing in the east part of the karst Canin massif (Led Zeppelin Abyss) (Western Julian Alps). *Ipogea*, 2: 141–150.
- FAJFAR, S. 2006: Voda iz Retij teče po drugi strani hriba. Delo, četrtek, 5. januarja 2006 (Ljubljana): 6–6.
- GAMS, I. 1965: Aperçu sur l'hydrologie du karst Slove et sus communications souterraines. Naše jame (Ljubljana) 7/1–2: 51–60.
- GAMS, I. 1966: Poročilo o barvanju v Dimnicah in v Triglavskem breznu leta 1964. *Acta carsologica* (Ljubljana) 4: 153–156.
- GAMS, I. 2004: Kras v Sloveniji v prostoru in času. Založba ZRC (Ljubljana): 1–515.
- GOSPODARIČ, R. & HABIČ, P. (eds.) 1976: Underground water tracing. Investigations in Slovenia 1972–1975. Institute Karst Research (Ljubljana): 1–312.
- HABIČ, P. 1989: Sledenje kraških voda v Sloveniji. Geografski vestnik (Ljubljana) 61: 3–20.
- HABIČ, P. & KOGOVŠEK, J. 1992: Sledenje voda v kraškem zaledju Krupe v JV Sloveniji. *Acta carsologica* (Ljubljana) 21: 35–76.
- HABIČ, P., KOGOVŠEK, J., BRICELJ, M. & ZUPAN, M. 1990: Izviri Dobličice in njihovo širše kraško zaledje. *Acta carsologica* (Ljubljana) 19: 5–100.
- JANEŽ, J., ČAR, J., HABIČ, P. & PODOBNIK, R. 1997: Vodno bogastvo Visokega krasa. *Geologija d.o.o.* (Idrija): 1–167.
- KÄSS, W. 1998: Tracing technique in geohydrology. Balkema (Rotterdam, Brookfield): 1–581.
- KOGOVŠEK, J. 1997: Pollution transport in the vadose zone. In: GÜNAY, G., JOHNSON, A.I., TEZCAN, L. & ATILLA, A.Ö. (eds.): Karst waters & environmental impacts: proceedings. Balkema (Rotterdam, Brookfield): 161–165.
- KOGOVŠEK, J. 1999: Nova spoznanja o podzemnem pretakanju vode v severnem delu Javornikov (Visoki kras). *Acta carsologica* (Ljubljana) 12: 161–200.
- KOGOVŠEK, J. 2000: Ugotavljanje načina pretakanja in prenosa snovi s sledilnim poskusom v naravnih razmerah. *Annales* (Koper) 10/1=19: 133–142.
- KOGOVŠEK, J. & PETRIČ, M. 2002: Podzemno raztekanje vode iz ponora Tržiščice (JV Slovenija). *Acta carsologica* (Ljubljana) 31/2: 75–91.
- KOGOVŠEK, J. & PETRIČ, M. 2004: Advantages of longer-term tracing – three case studies from Slovenia. *Environmental geology* (Berlin) 47: 76–83.
- KOGOVŠEK, J. & PETRIČ, M. 2006: Tracer test on the Mala gora landfill near Ribnica in south-eastern Slovenia. *Acta carsologica* (Ljubljana) 35/2: 91–101.
- KOGOVŠEK, J. & PETRIČ, M. 2007: Directions and dynamics of flow and transport of contaminants from the landfill near Sežana. *Acta carsologica* (Ljubljana) 36/3: 413–424.
- KOGOVŠEK, J., PRELOVŠEK, M. & PETRIČ, M. 2008: Underground water flow between Bloke plateau and Cerknica polje and hydrologic function of Križna jama, Slovenia. *Acta carsologica* (Ljubljana) 37/2–3: 213–225.
- KRANJC, A. (ed.) 1997: Karst Hydrogeological Investigations in South-Western Slovenia. *Acta carsologica* (Ljubljana) 26/1: 1–388.
- KRIVIC, P., BRICELJ, M., TRIŠIČ, N. & ZUPAN, M. 1987: Sledenje podzemnih vod v zaledju izvira Rižane (Slovenija, NW Jugoslavija). *Acta carsologica* (Ljubljana) 16: 83–104.
- KRIVIC, P., BRICELJ, M. & ZUPAN, M. 1989: Podzemne vode zveze na področju Čičarije in osrednjega dela Istre. *Acta carsologica* (Ljubljana) 18: 267–295.
- MOSETTI, F. 1965: Nuova interpretazione di un esperimento di marcatura radioattiva del Timavo. *Bolletino di Geofisica Teorica ed Applicata* 7/27: 218–243.
- NOVAK, D. 1990: Novejša sledenja kraških voda v Sloveniji po letu 1965. *Geologija* 33: 461–478.
- NOVAK, D. 1994: Raziskave na Temenici leta 1994. Naše jame (Ljubljana) 36: 109–110.
- NOVAK, D. 1996: Podzemeljske vode v Kamniških in Savinjskih Alpah. *Geologija* (Ljubljana) 37–38: 415–435.
- NOVAK, D. & ROGELJ, J. 1993: Hidrogeološke raziskave zaledja izvira Šumetac ob Kolpi. *Geologija* (Ljubljana) 35: 319–328.
- PREGI, M., KOGOVŠEK, J., PETRIČ, M., MULEC, J., PRELOVŠEK, M., TURK, J., DRAME, L., DROLE, F., HAJNA, J., ZADEL, M. & JUVAN, G. 2006: Poročilo za optimizacijo točk monitoringa onesnaženosti podzemnih voda: »Rezultati sledilnega poskusa z območja odlagališča Mozelj pri Kočevju«. Neobjavljeno poročilo. IRGO Ljubljana.
- PRESTOR, J., URBANC, J., JANŽA, M., RIKANOVIC, R. & STROJAN, M. 2004: Raziskave mejnih vodonosnikov med Tržaškim in Kvarnerskim zalivom na območju Republike Slovenije (III. faza). Neobjavljeno poročilo, Geološki zavod Slovenije.

- RAVBAR, N. 2007: The protection of karst waters. Inštitut za raziskovanje krasi ZRC SAZU (Postojna) in Založba ZRC (Ljubljana): 1–254.
- SCHULTE, U. 1994: Geologische und Hydrologische Untersuchung im Karst von Orehek (Slovenien). Diplomarbeit, Universität Karlsruhe: 1–105.
- STAUT, M. & AUERSPERGER, P. 2006: Tracing of the stream flowing through the cave Ferranova buža, central Slovenia. *Acta carsologica* (Ljubljana) 35/2: 83–89.
- ŠERKO, A. 1946: Barvanje ponikalnic v Sloveniji. *Geografski vestnik* (Ljubljana) 18: 125–139.
- TIMEUS, G. 1928: Nei misteri del mondo sotterraneo. *Alpi Giulie* (Trieste) 29: 1–38.
- TRIŠIČ, N., BAT, M., POLAJNAR, J. & PRISTOV, J. 1997: Water balance investigations in the Bohinj region. In: KRANJC, A. (ed.): *Tracer Hydrology* 97. Balkema (Rotterdam): 295–298.