



Vzpostavitev prosto dostopne GIS zbirke rezultatov sledenj toka podzemne vode in možnosti njene uporabe

Establishment of a freely accessible GIS database containing the results of groundwater tracing and possibilities of its use

Metka PETRIČ^{1,2*}, Nataša RAVBAR^{1,2}, Petra GOSTINČAR^{1,3}, Petra KRSNIK⁴ & Marina GACIN⁴

¹ZRC SAZU, Inštitut za raziskovanje krasa, Titov trg 2, 6230 Postojna, Slovenija;
e-mail: metka.petric@zrc-sazu.si, natasa.ravbar@zrc-sazu.si

²Krasoslovno študijsko središče Unesca, Univerza v Novi Gorici, Glavni trg 8, 5271 Vipava, Slovenija

³Sinergise laboratorij za geografske informacijske sisteme d.o.o., Cvetkova 29, 1000 Ljubljana, Slovenija;
e-mail: petra.go@gmail.com

⁴Agencija Republike Slovenije za okolje, Vojkova 1b, 1000 Ljubljana, Slovenija;
e-mail: petra.krsnik@gov.si, marina.gacin@gov.si

Prejeto / Received 5. 4. 2020; Sprejeto / Accepted 12. 11. 2020; Objavljeno na spletu / Published online 7. 12. 2020

Ključne besede: kras, sledilni poskus, podatkovna zbirka, analiza podatkov, Slovenija

Key words: karst, tracer test, database, data analysis, Slovenia

Izvleček

Sledenje toka podzemne vode z umetnimi sledili je raziskovalna metoda, ki daje zelo dobre rezultate pri proučevanju smeri in značilnosti podzemnega pretakanja vode v kraških vodonosnikih. Prve omembe tovrstnih poskusov na slovenskem krasu segajo daleč v zgodovino, začetki njihove rabe v procesu upravljanja z vodnimi viri pa v prva leta 20. stoletja. Od takrat naprej je bilo opravljenih še več kot dvesto sledenj. Žal so njihovi rezultati pogosto ostali zapisani le v internih poročilih v arhivih izvajalskih organizacij, ki so težje dostopna. Tudi iskanje objavljenih izsledkov je kljub možnostim rabe iskalnikov po ključnih besedah zamuden proces. Zaradi potreb po sistematičnem in hitro dostopnem digitalnem pregledu izsledkov sledilnih poskusov je bila izdelana in v Atlasu okolja (prostorski informacijski sistem Agencije RS za okolje) javno objavljena podatkovna zbirka, v kateri so urejeni in georeferencirani podatki o izvedbi in rezultatih 231 sledilnih poskusov. V članku so opisani idejna zasnova zbirke, proces zbiranja, preverjanja in ovrednotenja podatkov ter metoda njihove povezave v GIS podatkovno zbirko. Dva točkovna sloja predstavljata lokacije injiciranja in vzorčenja, linijski sloj pa različne tipe ugotovljenih povezav med njimi, ki so prikazani z določenim tipom in barvo linije. Ob kliku na posamezen element se izpišejo izbrani podatki o sledenju, večini pa je priložena tudi kopija vira podatkov (članki, poročila), kar omogoča pridobitev bolj podrobnih podatkov o sledilnem poskusu in njegovih rezultatih. Tako oblikovana zbirka podatkov omogoča različne primerjalne analize. V članku je prikazanih nekaj osnovnih statističnih analiz opravljenih sledenj po namenu, izvedbi in uporabljenih sledilih, po značilnostih lokacij injiciranja in vzorčenja ter po značilnostih in hitrostih podzemnih vodnih zvez. Podan je tudi pregled rezultatov opravljenih sledenj po posameznih vodnih telesih podzemne vode. Na osnovi ugotovljenega stanja so oblikovani predlogi za izvedbo novih sledenj.

Abstract

Tracing with artificial tracers is a research method that gives very good results in examining the direction and characteristics of groundwater flow in karst aquifers. The first mention of such experiments in Slovenian karst dates back to history and the beginnings of their use in the water resources management process in the first years of the 20th century. From that point on, more than two hundred tracer tests were carried out in Slovenian karst. Unfortunately, their results often remain hidden in internal reports in the archives of implementing organisations and are very difficult to access. The search for published results is also a time-consuming process, despite the possibilities of the use of search engines and key words. Due to the need for a systematic and rapidly accessible digital inventory of the tracer tests results, such inventory was designed and is now freely accessible in the Environmental Atlas (Atlas okolja), the spatial information system of Slovenian Environment Agency. In the database the results of 231 available tracer tests have been assembled, arranged and georeferenced. The article describes the data set concept, the process of collecting, verifying and evaluating data and the method of their transformation into a GIS database. Two points layers (injection site and sampling site) and one line layer (linear connection between both sites) were created. Symbolology of line layer varies with different type of connection between injection and sampling site. By clicking on an individual element, selected data on the tracer test are

displayed, and most of them are also accompanied by a copy of the data source (articles, reports). In this way it is possible to obtain more detailed information about the tracer test and its results. The database also provides a possibility of various comparative analyses. The article shows results of some of the basic statistical analyses in which the purpose and implementation of tracer tests, used tracers, characteristics of injection and sampling sites, and characteristics and velocities of groundwater flow connections were compared. It also provides an overview of the results of the tracer tests carried out within individual groundwater bodies. On the basis of the status identified, the locations for new tracer tests are proposed.

Uvod

V reviji *Geologija* je bil leta 2009 objavljen članek Pregled sledenja z umetnimi sledili na kraških območjih v Sloveniji (Petrič, 2009). Na osnovi pregleda dostopnih poročil o sledilnih poskusih so bile opisane njihove skupne značilnosti in na kratko predstavljeni rezultati sledenj, ki so bila izvedena v obdobju 1989–2008. Interval ni bil izbran naključno, ampak je predstavljal nadaljevanje že objavljenih tovrstnih pregledov v obdobju do leta 1988 (Šerko, 1946; Gams, 1965; Habič, 1989; Novak, 1990). V sklepih je bilo poudarjeno, da pomenijo rezultati starejših, na izbranem območju že predhodno opravljenih sledenj pomembno osnovo za oceno hidrogeoloških razmer in načrtovanje novih raziskav. Izpostavljena pa je bila tudi potreba po predstavitvi rezultatov v strokovnih publikacijah ali na konferencah, saj se na ta način lahko izognemo nepotrebnemu ponavljanju ali časovnemu in prostorskemu prekrievanju raziskav, možno je bolj natančno načrtovanje novih raziskav, objavljeni izsledki pa so lahko koristna informacija za vse, ki se lotevajo raziskovanja kraških vodonosnikov ali upravljanja z njimi. Žal so rezultati številnih poskusov ostali zapisani le v internih poročilih v arhivih izvajalskih organizacij, ki so težje dostopna.

V naslednjih letih se je zato razvijala ideja, da bi lahko na Inštitutu za raziskovanje krasa ZRC SAZU (IZRK) več let grajeno zbirko rezultatov sledenj pripravili v javno dostopni obliki. Zaradi ocenjevanja kemijskega stanja kraških vodonosnikov, varovanja vodnih virov na krasu in zaradi hitrega in učinkovitega ukrepanja v primerih njihovega onesnaženja je namreč sistematičen, hitro dostopen digitalni pregled rezultatov sledilnih poskusov potreben in nujen. Pobudo je sprejela Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO), ki je skrbnik tovrstnih zbirk podatkov (npr. meteorološki in hidrološki podatki, podatki o kakovosti voda; vse večinoma prosto dostopno na spletnih straneh) in v letu 2018 je IZRK izdelal projektno nalogo Podatkovna zbirka rezultatov sledenja toka podzemne vode v Sloveniji (Petrič et al., 2018). Po obdobju preverjanja in prilaganja zahtevam prikaza na spletu je bila zbirka javno objavljena v sklopu ARSO Atlasa okolja na

strani http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXLŽArso v sloju VODE/SLEDILNI POSKUSI. Dogovorjeno je bilo, da bodo popravki in dopolnitve pripravljeni vsaki 2 leti in ob koncu leta 2019 je bila na IZRK za ARSO izdelana projektna naloga Dopolnitev podatkovne zbirke rezultatov sledenja toka podzemne vode v Sloveniji za podporo ukrepom NUV2: OS3.2b2 in OS6 (Petrič et al., 2019). Pri nalogi je sodeloval Geološki zavod Slovenije (GeoZS) in za vključitev v zbirko pripravil pregled rezultatov sledilnih poskusov, ki so jih opravili sodelavci te organizacije ali njenih pravnih predhodnikov, poročila pa so bila shranjena v knjižnici GeoZS (Meglič et al., 2019). Dodatno so z željo po vključitvi razpoložljivih podatkov v zbirko interna poročila o opravljenih sledenjih posredovali tudi z ARSO in podjetja *Geologija d.o.o.* Idrija. Kjer je bilo to potrebno, so bila za objavo rezultatov pridobljena soglasja naročnikov projektov.

Idejna zasnova podatkovne zbirke, proces zbiranja, preverjanja in vrednotenja podatkov ter metoda njihove povezave v GIS bazo so bili že opisani v reviji *Applied Geography* (Petrič et al., 2020). V tem članku so povzete glavne značilnosti vzpostavitve zbirke rezultatov sledenj toka podzemne vode, dodatno in bolj podrobno pa predstavljeni možnosti in načini njene rabe, značilnosti izvedenih sledenj in ugotovljenih podzemnih vodnih zvez ter rezultati opravljenih sledenj po posameznih vodnih telesih podzemne vode. Na osnovi ugotovljenega stanja so oblikovani predlogi za izvedbo novih sledenj.

Kraški vodonosniki in metoda sledenja z umetnimi sledili

Kras je poseben tip pokrajine na vodotopnih kamninah (predvsem apnenec in dolomit) z značilnimi površinskimi in podzemnimi kraškimi oblikami. Zaradi razpokanosti in pretrtosti kamnin deževnica hitro pronica skozi golo kraško površje ali skromni prsteni pokrov v podzemlje. Na stiku s krasom ponikajo tudi površinski vodotoki z nekraškega obrobja. V podzemlju se voda pretaka skozi sistem različno velikih ter med seboj povezanih kraških kanalov in razpok. Struktura in delovanje kraških vodonosnikov se močno

razlikujeta od nekraških (npr. medzrnskih), saj ju določajo izjemno visoka prepustnost in velike hitrosti pretakanja voda v podzemlju, raznovrstnost načina pretakanja ter običajno neznane smeri odtekanja vode, ki segajo tudi do več deset kilometrov oddaljenih predelov. V krasu se pogosto meša voda z različnih območij napajanja.

Čeprav pokrivajo kraške kamnine le 7 do 12 % zemeljskega površja, se s pitno vodo iz kraških vodonosnikov oskrbuje skoraj četrtina svetovnega prebivalstva (Ford & Williams, 2007). V Sloveniji je ta delež še večji, saj obsegajo karbonatne kamnine približno 43 % njenega ozemlja. Prevladujejo predvsem v zahodnem in južnem delu države, kjer gradijo obsežne kraške in razpoklinske vodonosnike. Ti zagotavljajo pitno vodo za približno polovico prebivalcev Slovenije (Bat & Uhan, 2003; Gams, 2004).

Zaradi posebnih značilnosti so kraški vodonosniki izjemno ranljivi za različne vire onesnaževanja. Odsotnost debelejših slojev prsti in sedimentov ter dobra prepustnost kraških kamnin omogočata hitro infiltracijo vode v podzemlje, znotraj tega pa poteka zelo hitro pretakanje na velikih razdaljah in po navadno neznanih poteh. Z vodo se lahko hitro širi tudi onesnaženje, ki ogroža vodne vire. Zaradi neenotne zgradbe kraških vodonosnikov je zelo težko predvideti smeri in režim pretakanja podzemne vode in s tem tudi prenosa škodljivih snovi.

Dobro poznavanje delovanja kraških vodonosnikov je zato predpogoj za njihovo ustrezno varovanje. Kam in kako hitro se onesnaženje s kraškega površja širi v kraški notranjosti in v katerih izviri ga lahko pričakujemo, lahko uspešno napovemo le, če zadosti dobro poznamo hidrogeološke razmere na obravnavanem območju. Za to so potrebne ustrezne raziskave, kot zelo primerna v krasu se je pokazala metoda sledenja z umetnimi sledili. Čeprav se je skozi zgodovino metodologija spreminjala in razvijala, pa ostaja osnovna ideja sledenja enaka. Določeno snov s primernimi lastnostmi (v vodi topna, okolju neškodljiva snov, ki jo je z ustreznimi napravami možno zaznati v že zelo nizkih koncentracijah) neposredno ali posredno vnesemo v vodni tok in potem opazujemo kje, kdaj in v kakšnih koncentracijah se bo pojavila. Glavni namen je običajno določitev smeri in hitrosti podzemnega pretakanja vode ter omejitev prispevnega zaledja izvirov. Možna je tudi določitev deleža povrnjenega sledila v posameznih točkah vzorčenja (izviri, vodni tokovi v jamah, vrtine). Ob skrbnem načrtovanju poskusa ter dovolj dolgem in natančnem vzorčenju pojava sledila je možna tudi podrobna študija značilnosti preta-

kanja podzemnih vod, prenosa v njih raztopljenih snovi ter značilnosti njihovega iztekanja iz sistema (koncentracija, trajanje). 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 uporabna in načini njene uporabe še bolj inovativni. Verjetno najbolj celovit opis metode je pripravil Käss (1998), dodatne informacije pa je možno pridobiti v drugih virih (npr. Behrens et al., 2000; Benischke et al., 2007; Goldscheider et al., 2008).

Za uspešno izvedbo sledilnega poskusa so potrebne predhodne raziskave (hidrološke, geološke, speleološke, hidrokemijske, ipd.), ki pomagajo pri izbiri najbolj primerne sledila in njegove količine. Ugotovljene značilnosti upoštevamo tudi pri načrtovanju injiciranja in vzorčenja, ki ga med samim poskusom prilagajamo hidrološkim razmeram in rezultatom sprotih analiz pojava sledila v točkah opazovanja. Ker je lahko zadrževanje sledila v krasu dolgotrajno, je potrebno poskus izvajati dovolj dolgo, tudi v obdobju enega leta ali več. Na opazovanih točkah si namreč prizadevamo ujeti (»dobiti povrnjeno«) večino injiciranega sledila. Za oceno količine povrnjenega sledila je potrebno vzpostaviti tudi merjenje pretoka na teh točkah.

Podatkovna zbirka rezultatov sledilnih poskusov na slovenskem krasu

Prvi sledilni poskusi na slovenskem krasu

Kranjc (2000) kot prvega, ki je na krasu na območju današnje Slovenije uporabil neko vrsto umetnega sledila, omenja očeta Pietra Imperata. Ta je leta 1599 ugotavljal podzemno vodno povezavo med ponorom Reke v Škocjanske jame in izviri Timave v Tržaškem zalivu. Isti vir omenja še Kandlerja, ki je leta 1864 Reko obarval z modrim barvilom – indigom, in Müllerja, ki je leta 1891 uporabil fluorescentno sledilo uranin. To je bila prva študija, v kateri so z namenom izboljšanja oskrbe Trsta s pitno vodo proučevali smer toka in zadrževalni čas podzemne vode na območju matičnega krasa (Müller, 1891). Zanimivo je, da se je to zgodilo le 14 let po tem, ko je bilo med ponorom reke Donave in izvirom Aach v Nemčiji opravljeno nasploh prvo sledenje s kvantitativno obdelavo rezultatov (Knop, 1878). Prvo sledenje na slovenskem krasu, za katerega je bilo možno pridobiti tudi bolj podrobne podatke, je opravil Timeus (1928), ki je 23. decembra 1907 v ponor Reke injiciral uranin in litijev klorid ter ugotovil podzemno vodno povezavo z izviri Timave in

drugimi manjšimi izviri v bližini Trsta. Z iskanjem informacij po objavljenih in neobjavljenih virih smo ugotovili, da je bilo od takrat naprej na slovenskem krasu opravljenih še več kot dvesto poskusov z umetnimi sledili.

Zbiranje podatkov in oblikovanje podatkovne zbirke

Na IZRK se je za potrebe različnih projektov z vzpostavitvijo interne zbirke podatkov o sledilnih poskusih na slovenskem krasu začelo v letu 2004. Izbran je bil osnovni nabor podatkov, ki naj jih zbirka vsebuje, in oblikovan modul za način njihovega vnosa v preglednice programa Microsoft Excel; izdelan je bil tudi seznam uporabljenih virov. Za potrebe ARSO projektne naloge (Petrič et al., 2018) so bili ti objavljeni in neobjavljeni viri dodatno pregledani in zbrane informacije preverjene. Zbirka je bila razširjena z naborom dodatnih podatkov, s sistematičnim pregledovanjem pa so bili najdeni tudi novi objavljeni in neobjavljeni viri. Skupaj je bilo tako v zbirko po pregledu 103 virov vključenih 200 sledenj, ki so bila izvedena med leti 1905 in 2015. Od tega je bilo 159 enostavnih sledenj z eno samo točko injiciranja in eno vrsto uporabljenega sledila, 5 kombiniranih sledenj z eno točko injiciranja, a več uporabljenimi sledili, ter 36 kombiniranih sledenj z več istočasno vključenimi točkami injiciranja (največ 10) in več različnimi uporabljenimi sledili. Če ta kombinirana sledenja štejemo ločeno, je bilo v zbirko vključenih 267 injiciranj.

Sledilni poskusi so bili urejeni kronološko glede na datum vnosa sledila, podatki o točkah vnosa sledila in spremljanja njegovega pojava pa so bili georeferencirani. Osnovni podatki, ki so zbrani v posameznih stolpcih MS Excelove preglednice, so tudi glavni atributi GIS podatkovne zbirke (Petrič et al., 2020). Dodane so jim ustrezne identifikacijske (ID) vrednosti (primarni ID zbirke, ID sledilnega poskusa, ID mesta injiciranja in ID mesta vzorčenja). Oznake vseh vključenih atributov v MS Excelovo preglednico in GIS podatkovno zbirko ter njihov opis so podani v tabeli 1.

V okviru izdelave GIS podatkovne zbirke podatkov smo se osredotočili tudi na izboljšanje kakovosti prostorskih podatkov, tj. izboljšanje podatkov o legi in nadmorski višini mest injiciranja in vzorčenja. Podatki o lokaciji in nadmorski višini, ki smo jih povzeli iz virov, so bili v nekaterih primerih določeni bodisi opisno, bodisi na skicah, ali pa je šlo za podatke, pridobljene iz starejših virov, kjer je bil vir določitve lege, predvsem pa nadmorske višine, manj natančen od trenutno dostopnih virov.

Lokacije mest vnosa sledil in vzorčenj smo uskladili z obstoječimi podatkovnimi zbirkami, in sicer z lokacijami v sloju Hidrografija v Atlasu voda (Internet 1), z lokacijami jamskih vhodov in rogov v Katastru jam (Jamarska zveza Slovenije in Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU) ali jih locirali na podlagi topografskih načrtov in zemljevidov različnega merila ter podatkov laserskega skeniranja Slovenije (Internet 2). Nadmorska višina je bila določena na podlagi podatkov laserskega skeniranja Slovenije (kjer gre za površinske točke v Sloveniji), na podlagi digitalnega modela višin 12,5 m (kjer gre za površinske točke izven Slovenije v bližini državne meje; Geodetska uprava Republike Slovenije), na podlagi podatkov iz Katastra jam (npr. nadmorske višine rogov) ali pa na podlagi podatkov, navedenih v virih (točke pod površjem, točke izven Slovenije itn.). Pri tovrstnem usklajevanju je zelo pomembno, da so različne evidence z nekega območja čimbolj usklajene. Na dolgi rok se tako gradi kakovostna podatkovna zbirka o vodah v Sloveniji, če pa gledamo še širše, se bodo ti podatki lahko v prihodnje povezovali v večje zbirke, na primer z geološkimi podatki (npr. podatki o vrtinah).

Z uporabo ArcGIS programske opreme so bili pripravljeni trije podatkovni sloji v shape formatu (.shp): mesta injiciranja (točke), mesta vzorčenja (točke) in povezave (linije). Bolj podrobno je postopek opisan v članku Petrič et al. (2020). Povezave predstavljajo različne tipe s sledilnim poskusom ugotovljenih podzemnih vodenih zvez med mesti injiciranja in vzorčenja (glavna, stranska, nezanesljiva, ni povezave; atribut POV_TIP) in so prikazane z določenim tipom in barvo linije (puščica v smeri od mesta injiciranja do mesta vzorčenja). Vsakemu sloju so bili dodani izbrani parametri iz tabele 1, ki se izpišejo ob kliku na izbrani element (točka ali linija) v GIS podatkovni zbirki. Posamezen element lahko vključuje podatke za več sledilnih poskusov, ki so bili izvedeni na isti lokaciji v različnih obdobjih. Opozoriti velja na atribut OPOMBE, ki lahko vključuje ali komentar izvajalca o izvedbi ali rezultatih sledilnega poskusa ali komentar avtorjev zbirke podatkov o izvedbi ali rezultatih sledilnega poskusa ali o viru, iz katerega so bili podatki o sledenju povzeti. To omogoča oceno zanesljivosti rezultatov starejših sledenj, pri katerih je težko oceniti kakovost izvedbe, saj je bila v preteklosti metoda sledenj z umetnimi sledili še v razvoju, slabše so bile tudi tehnične možnosti vzorčenja in določanja koncentracij sledil. Zelo pomemben dodatek zbirke so zato viri podatkov (npr. članki,

Tabela 1. Opis pomena atributov v MS Excelovi preglednici in GIS podatkovni zbirki.
Table 1. Description of the meaning of attributes in the MS Excel table and GIS database.

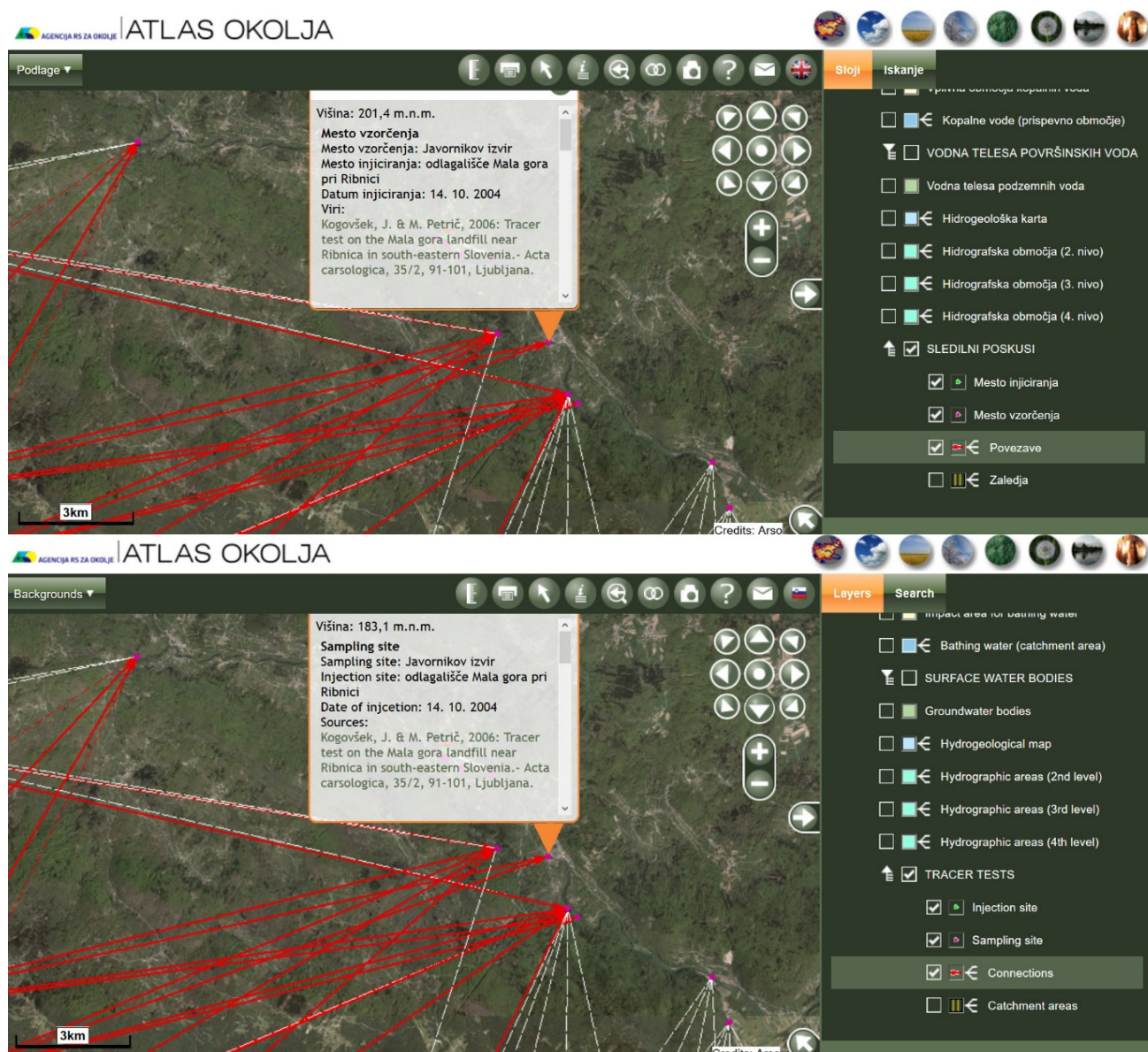
Oznaka atributa v MS Excelu Attribute label in MS Excel	Oznaka atributa v GIS podatkovni zbirki Attribute label in the GIS database	Opis pomena atributa <i>Description of the attribute's meaning</i>
ID	ID	primarni ID zbirke <i>primary database ID</i>
ID_S	ID_S	ID sledilnega poskusa; v primeru kombiniranega sledenja z istočasnim injiciranjem na različnih lokacijah ali uporabe več različnih sledil na isti lokaciji je številki dodana še zaporedna številka sledenja (_01, _02, itd.) <i>tracer test ID; in the case of a multi-tracer test with a simultaneous injection of the tracers in different locations or the use of several different tracers in the same location, this number is added the sequence number of the tracing (_01, _02, etc.)</i>
ZŠ	ZS	zaporedna številka izvedenega poskusa, kronološko zaporedje; v primeru kombiniranega sledenja z istočasnim injiciranjem na različnih lokacijah ali uporabe več različnih sledil na isti lokaciji je številki dodana še zaporedna črka <i>sequence number of the conducted test, a chronological sequence; in the case of a multi-tracer test with a simultaneous injection of the tracers in different locations or the use of several different tracers in the same location, this number is added a sequence letter</i>
ŠVT-injiciranje	SVT_I	šifra vodnega telesa v točki injiciranja; za točke izven Slovenije zapisana kratica države <i>code of the water body at the injection point; for points outside of Slovenia, the country's abbreviation is given</i>
Ime vodnega telesa	IME_V_T	ime vodnega telesa za točko injiciranja; za točke izven Slovenije zapisano ime države <i>name of the water body at the injection point; for points outside of Slovenia, the country's name is given</i>
Datum injiciranja	DATUM_I	datum vnosa sledila na točki injiciranja <i>tracer injection date</i>
ID_I	ID_I	ID mesta injiciranja <i>injection point ID</i>
Mesto injiciranja	MESTO_I	ime lokacije vnosa sledila <i>name of the tracer injection location</i>
Način injiciranja	NACIN	opisuje način vnosa sledila v podzemlje <i>description of the method of tracer injection into the groundwater</i>
Yi	Yi	GK Y koordinata točke vnosa sledila v D48 <i>Gauss-Krüger Y coordinate of the tracer injection point in the coordinate system D48</i>
Xi	Xi	GK X koordinata točke vnosa sledila v D48 <i>Gauss-Krüger X coordinate of the tracer injection point in the coordinate system D48</i>
Zi	Zi	nadmorska višina točke vnosa sledila <i>altitude of the tracer injection point [m a.s.l.]</i>
Zi_vir	Zi_VIR	vir podatka o nadmorski višini točke vnosa sledila <i>source of information on the altitude of the tracer injection point</i>
Sledilo	SLEDILO	uporabljena vrsta sledila <i>type of tracer used</i>
Količina	KOLICINA	količina sledila, ki je bila uporabljena pri injiciranju <i>amount of tracer injected</i>
Hidrološko stanje - vodostaj	VODOSTAJ	ocena hidroloških razmer v času trajanja sledilnega poskusa (nizek, srednji, visok vodostaj) <i>assessment of the hydrological conditions throughout the tracer test (low, medium, high water level)</i>
ID_V	ID_V	ID mesta vzorčenja <i>sampling point ID</i>
Mesto vzorčenja	MESTO_V	vse lokacije, na katerih je z vzorčenjem, meritvami ali opazovanjem potekalo spremljanje pojava sledila <i>all locations in which the tracer appearance was monitored through sampling, measurements or observation (sampling point)</i>

Tip vzorčnega mesta	TIP	opis mesta vzorčenja (izvir, površinski tok, jamski tok, ipd) <i>sampling point description (spring, surface stream, cave stream, etc.)</i>
Yv	Yv	GK Y koordinata točke spremljanja pojava sledila v D48 <i>Gauss-Krüger Y coordinate of the sampling point in the coordinate system D48</i>
Xv	Xv	GK X koordinata točke spremljanja pojava sledila v D48 <i>Gauss-Krüger X coordinate of the sampling point in the coordinate system D48</i>
Zv	Zv	nadmorska višina točke spremljanja pojava sledila <i>altitude of the sampling point [m a.s.l.]</i>
ZV_vir	Zv_VIR	vir podatka o nadmorski višini točke spremljanja pojava sledila <i>source of information on the altitude of the sampling point</i>
ŠVT_vzorčenje	SVT_V	šifra vodnega telesa za točke spremljanja pojava sledila <i>code of the water body for sampling points</i>
Povezava	POVEZAVA	za ugotovljene podzemne zveze opredelitev glavne ali stranske povezave, »neza-nesljivo« oznaka za rezultate, ko zveze ni možno z zanesljivostjo potrditi in »ne« oznaka za lokacije, kjer se sledilo zanesljivo ni pojavilo <i>for identified groundwater connections, a main or secondary connection is specified; the label "uncertain" applies to results where a connection cannot be confirmed with certainty, while the label "no" denotes locations where the tracer did not appear</i>
Tip povezave	POV_TIP	označen tip povezave: glavna=1, stranska=2, nezanesljivo=3, ne=0 <i>marks the type of connection: main=1, secondary=2, uncertain=3, no=0</i>
Maksimalna koncentracija sledila (mg/m ³)	MAX_SLED	najvišja izmerjena koncentracija sledila na točki vzorčenja v času trajanja sledilnega poskusa <i>maximum tracer concentration measured at the sampling point during the tracer test [mg/m³]</i>
Navidezna maksimalna hitrost (m/h)	NAV_MAX	izračunana navidezna hitrost pretakanja sledila glede na zračno razdaljo med točko injiciranja in točko pojava sledila ter časom od injiciranja do prvega pojava koncentracije sledila nad mejo detekcije <i>calculated linear maximum flow velocity based on the linear distance between the injection point and the point of tracer appearance, and on the time between injection and the first appearance of tracer concentration above the detection limit [m/h]</i>
Navidezna dominantna hitrost (m/h)	NAV_DOM	izračunana navidezna hitrost pretakanja sledila glede na zračno razdaljo med točko injiciranja in točko pojava sledila ter časom od injiciranja do pojava maksimalne koncentracije sledila <i>calculated linear dominant flow velocity based on the linear distance between the injection point and the point of tracer appearance, and on the time between injection and the appearance of maximum tracer concentration [m/h]</i>
Delež povrnjenega sledila	DELEZ	izračunan odstotek količine povrnjenega sledila glede na celotno količino injiciranega sledila <i>calculated percent of the amount of recovered tracer with regard to the entire amount of injected tracer [%]</i>
Trajanje vzorčenja (mesece)	TRAJANJE	obdobje od injiciranja sledila do konca spremljanja pojava sledila na posameznih točkah <i>period between injecting the tracer and ending the monitoring of tracer appearance at individual points</i>
Izvajalec	IZVAJALEC	priimek osebe ali kratica organizacije, ki je sledilni poskus izvedla <i>last name of the person or acronym of the organization that conducted the tracer test</i>
Viri	VIRI	citirano objavljeno ali neobjavljeno delo, po katerem so bili povzeti podatki o izvedenem sledilnem poskusu; večina virov je skeniranih in so priloženi v pdf obliki <i>the cited published or unpublished work from which the information on the conducted tracer test was taken; most sources have been scanned and are attached in PDF format</i>
Namen raziskave	NAMEN	na kratko opisan namen načrtovanja in izvedbe sledilnega poskusa <i>briefly describes the purpose of planning and implementing the tracer test</i>
Širše območje raziskave	OBM	geografski ali hidrogeološki opis širšega območja opravljenega sledenja <i>geographical or hydrogeological description of the broader area in which the tracing was conducted</i>
Opombe/Ovrednotenje	OPOMBE	vkjučuje komentar izvajalca o izvedbi ali rezultatih sledilnega poskusa ali komentar avtorjev zbirke podatkov o izvedbi ali rezultatih sledilnega poskusa ali o viru, iz katerega so bili podatki o sledenju povzeti <i>contains the implementer's comment on the tracer test implementation or results, or a comment from the database authors on the tracer test implementation or results, or on the source from which the tracing data have been taken</i>

knjige, poročila; atribut VIRI), ki so priloženi v pdf obliki in omogočajo pridobitev bolj podrobnih podatkov o izvedenem sledilnem poskusu in njegovih rezultatih.

Izdelana GIS zbirka je bila prilagojena zahtevam objave v sklopu ARSO Atlasa okolja in po obdobju preverjanja v začetku jeseni 2019 javno objavljena na strani http://gis.arso.gov.si/atlas-okolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso (sl. 1). Zaradi preglednosti se ob uporabi gumba i (Točkovni presek vseh prižganih slojev) ob kliku na posamezen element izpišejo le osnovni parametri: pri točki injiciranja mesto in datum injiciranja ter uporabljeno sledilo, pri točki vzorčenja mesto vzorčenja ter mesto in datum injiciranja, pri liniji povezave pa tip povezave, mesto in datum injiciranja ter uporabljeno sledilo, mesto

vzorčenja in ugotovljena navidezna dominantna hitrost. Pri vseh elementih je naveden še vir podatka in s klikom na ta zapis se odpre ustrezno poročilo o sledilnem poskusu v pdf obliki (če je to poročilo javno dostopno). Ob kliku na puščico (Odpre orodje za izbiro elementov na mapi) in izbiri posameznega elementa pa se ob kliku na ustrezen simbol odpre tabela atributov izbranih elementov v novem oknu. Na ta način je možno dostopati do vseh podatkov, ki so vključeni v zbirko. Trem slojem z rezultati sledilnih poskusov je dodan podatkovni sloj zaledja, v katerem je prikazan obseg prispevnih zaledij za izbrane izvire. Vanj smo vključili podatke le za izvire, za katere smo obseg prispevnih zaledij določili že predhodno v sklopu različnih projektov.



Sl. 1. Pogled na podatkovno zbirko rezultatov sledilnih poskusov v Atlasu okolja (zgornja slika).

Fig. 1. View on the tracer tests database in the Environmental Atlas (figure below).

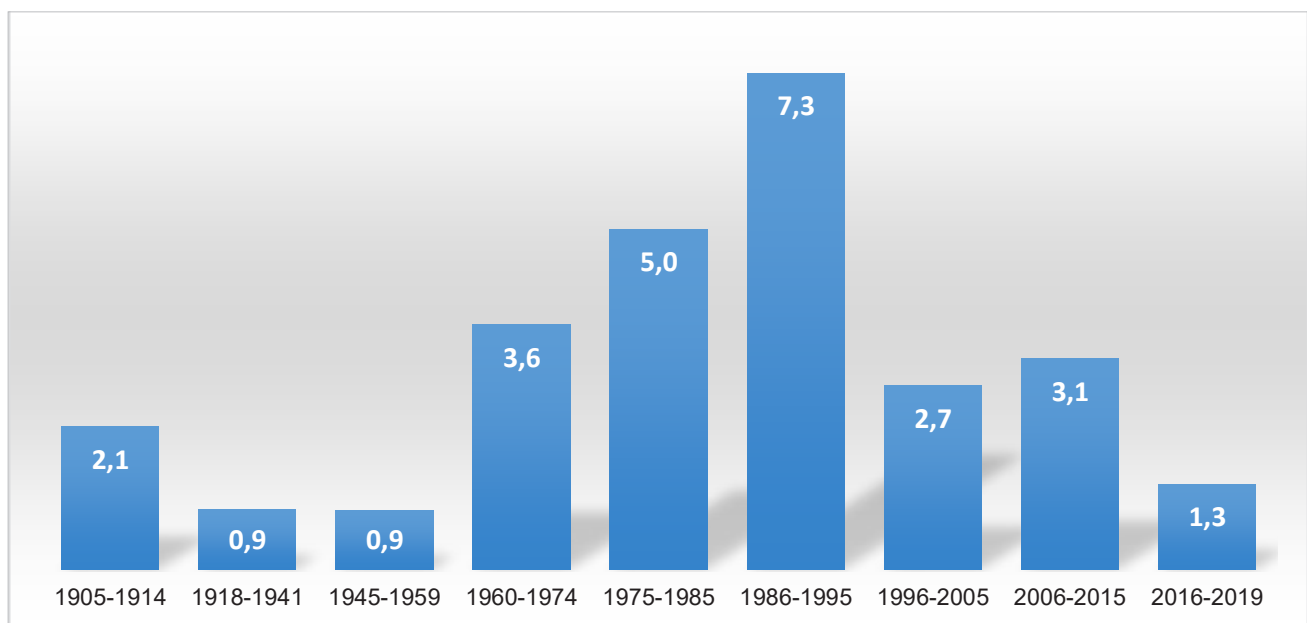
Kot je bilo v prvi fazi predvideno, je bilo v sklopu druge projektne naloge približno dve leti po prvi postavitvi zbirke izvedeno njeno obnavljanje in dopolnjevanje (dopolnjeni podatki za 28 sledenj in dodanih 31 novih sledenj). Podatke so, poleg Inštituta za raziskovanje krasa ZRC SAZU, prispevale tudi druge organizacije. Na Geološkem zavodu Slovenije (Meglič et al., 2019) so v že obstoječo zbirko dodali nekatere podatke in vnesli potrebne popravke (za 23 sledenj) ter jo dopolnili s podatki o sledenjih, ki prej vanjo še niso bila vključena (21 sledenj). Objavljena poročila o 5 sledilnih poskusih so zbirki priložena v pdf obliki, v neobjavljena poročila iz njihovega arhiva pa je ob soglasju naročnika omogočen le osebni pogled v knjižnici GeoZS. Geologija d.o.o. Idrija je ob soglasju naročnikov prispevala podatke za 5 sledenj, ki so bila dodatno vključena v zbirko. Skupno je torej po pregledanih 147 virih v zbirki 231 sledenj, ki so bila izvedena med leti 1905 in 2019. Od tega je bilo 189 enostavnih sledenj z eno samo točko injiciranja in eno vrsto uporabljenega sledila, 5 kombiniranih sledenj z eno točko injiciranja, a več uporabljenimi sledili ter 37 kombiniranih sledenj z več istočasno vključenimi točkami injiciranja (največ 10) in več različnimi uporabljenimi sledili. Če ta kombinirana sledenja štejemo ločeno, je bilo v zbirko vključenih 300 injiciranj (Petrič et al., 2020).

Zelo verjetno je, da se v arhivih ali celo med objavljenimi deli skriva poročilo o še kakšnem sledilnem poskusu na slovenskem krasu, ki v zbirko še ni vključen, gotovo pa je, da bo v pri-

hodnji letih izvedenih več novih sledenj. Zato ostaja pomembna zaveza o dopolnjevanju in obnavljanju zbirke na dve leti.

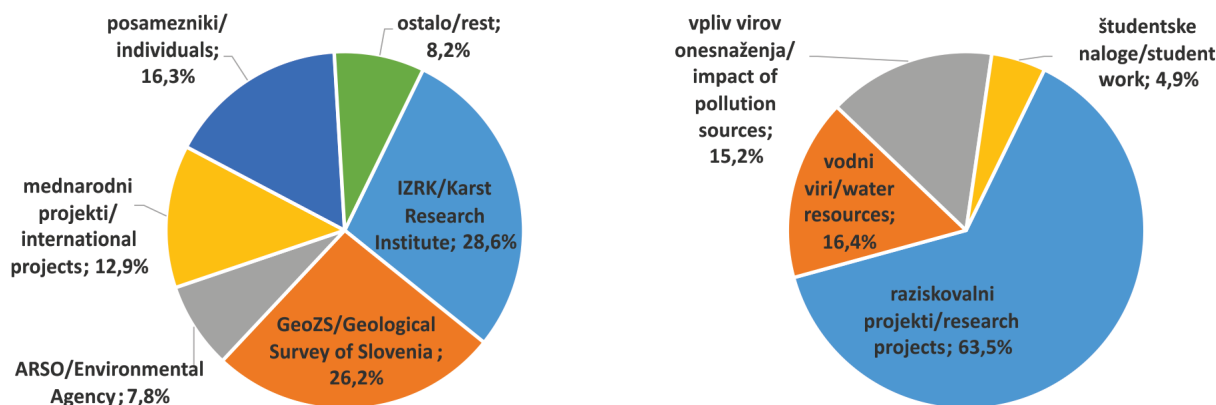
Značilnosti opravljenih sledilnih poskusov in dobljenih rezultatov

Izdelana podatkovna zbirka sledenj omogoča različne primerjave in statistične analize. V nadaljevanju je predstavljenih nekaj osnovnih značilnosti, vsako izmed 300 injiciranj je bilo upoštevano kot samostojno sledenje. Že pred 1. svetovno vojno (do leta 1914) je bilo teh sledenj 21, oz. v povprečju 2,1 na leto (sl. 2). V času med obema vojnoma (1918–1941) so bili poskusi redki in sicer v povprečju manj kot en poskus na leto, podobno je bilo v obdobju po 2. svetovni vojni, ko je ta raziskovalna metoda le počasi pridobivala na veljavi. V 60-ih in začetku 70-ih let so potekale zelo intenzivne raziskave, povezane z energetskimi načrti na območju kraških polj in izboljševanjem oskrbe s pitno vodo, ki so vključevale tudi sledilne poskuse (povprečno 3,6 na leto). Neke vrste mejnik pri razvoju metode sledenj v Sloveniji pa je bil začetek mednarodnega sodelovanja z združenjem za sledilno hidrologijo ATH (Association of Tracer Hydrology), ki je omogočilo izvedbo velikih, kombiniranih sledilnih poskusov in preizkušanje novih sledil. V tem obdobju je bilo izvedenih povprečno 5 sledenj letno. V obdobju 1986–1995, ko so spet prevladovala raziskave za ureditev oskrbe s pitno vodo, je bilo opravljenih največ sledilnih poskusov in sicer v povprečju več kot 7 na leto. V naslednjih



Sl. 2. Povprečno število opravljenih sledenj na leto po izbranih obdobjih (zaradi izbire obdobji glede na vsebinske značilnosti je njihovo trajanje različno dolgo).

Fig. 2. Average yearly number of tracer tests by selected time periods (their duration varies due to the choice of periods according to some historical events).



Sl. 3. Prikaz deleža opravljenih sledenj po izvajalcih (levo) in po namenu izvedbe (desno).

Fig. 3. Presentation of the proportion of performed tracings according to the operators of the tests (left) and the purpose of their implementation (right).

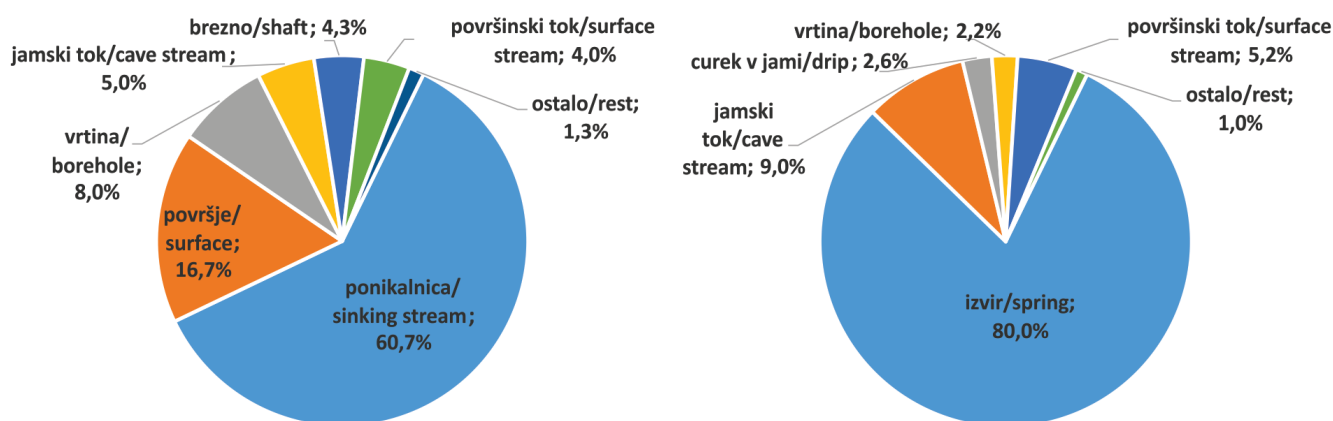
dvajsetih letih je število opravljenih sledenj upadlo (okrog 3 na leto), le nekaj več kot eno sledenje letno pa je bilo izvedeno v obdobju 2016–2019. Možna razlaga za tako nizko vrednost je tudi ta, da rezultati sledenj v teh zadnjih letih še niso bili ustrezno obdelani in objavljeni.

Največ sledenj (84) so opravili sodelavci Inštituta za raziskovanje krasa (IZRK), le malo manj (77) pa sodelavci Geološkega zavoda Slovenije ali njegovih pravnih predhodnikov (GeoZS) (sl. 3). Predvsem med leti 1950 in 1965 so bili zelo dejavni na Hidrometeorološkem zavodu, ki se je leta 2001 preoblikoval v Agencijo Republike Slovenije za okolje (ARSO), skupaj so izvedli 23 sledenj. Za razvoj raziskovalne metode je bilo pomembno sodelovanje v mednarodnih in čezmejnih projektih (skupaj 38 sledenj). Predvsem v začetnem obdobju so kot izvajalci velikokrat navedeni le posamezniki.

Za večino sledenj, ki so vključena v zbirko, je naveden tudi namen izvedbe. V nekaterih prime-

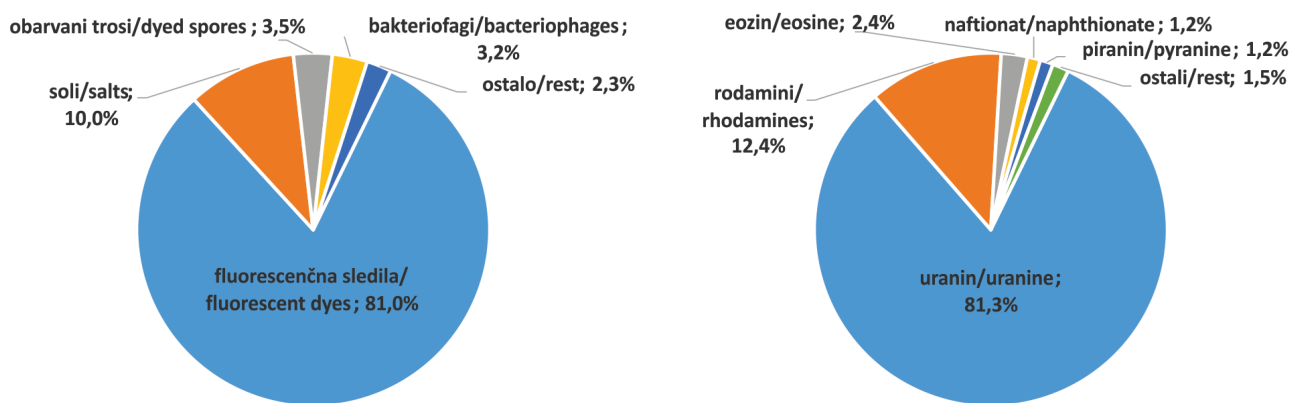
rih je bilo o namenu sledenja možno sklepati na osnovi besedila poročila. V veliki večini so bila sledenja izvedena v sklopu raziskovalnih projektov (63,5 %), kar kaže na to, da pomen in koristnost sledilnih poskusov še nista v zadostni meri prepoznana pri načrtovanju posegov v občutljiv kraški prostor (sl. 3). Vseeno je bila približno tretjina sledenj izvedena z namenom izboljšanja oskrbe s pitno vodo in njenega varovanja (16,4 %) in ocenjevanja vplivov različnih virov onesnaževanja na kraške vode (15,2 %). Nekaj sledenj (4,9 %) je bilo izvedenih tudi v sklopu doktorskih, magistrskih in diplomskih nalog.

Razvoj ideje sledenja je v tesni zvezi s ponikanjem površinskih tokov v podzemlje in vprašanji, kam te vode odteka in kje se vračajo na površje. V veliki večini poskusov je bilo tako sledilo injicirano v ponikalnico (približno 61 %) in v preteklosti je bil drugačen način vnosa sledila izbran le izjemoma (sl. 4). Med posameznimi lokacijami je na prvem mestu ponor Pivke v Po-



Sl. 4. Prikaz deleža opravljenih sledenj glede na tip mesta injiciranja (levo) in mesta vzorčenja (desno).

Fig. 4. Presentation of the proportion of performed tracings according to the types of injection points (left) and of sampling points (right).



Sl. 5. Prikaz deleža opravljenih sledenj glede na uporabljeni tip sledila (levo); za najbolj pogosto uporabljena fluorescentna sledila so prikazani še deleži po posameznih vrstah teh sledil (desno).

Fig. 5. Presentation of the proportion of performed tracings according to the type of injected tracer (left); and according to the individual types of fluorescent dyes which are the most commonly used tracers (right).

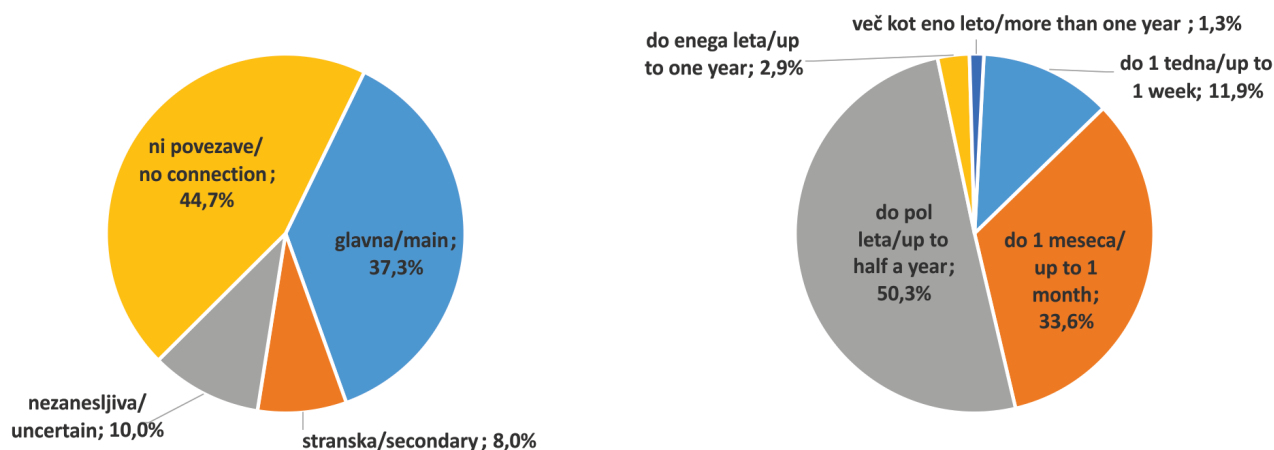
stojnsko jamo (7 sledenj). Še večkrat je bilo sledilo injicirano v različne ponore na Cerkniskem in Planinskem polju (skupaj 12 in 9). V zadnjih letih pa se sledilni poskusi vedno bolj uveljavljajo kot primerna metoda za študij značilnosti toka vode in prenosa snovi v vadozni (nezasičeni) coni z injiciranjem sledila razpršeno ali v razpoko na površju (16,7 %).

V sledenja je bilo vključenih 1528 mest vzorčenja, številna seveda večkrat. Močno prevladujejo izviri (80 %), v kraških jamah in rudnikih je bil pogostejše vzorčen vodni tok (9 %), manjkrat pa curki prenikle vode (2,6 %) (sl. 4). Večkrat so se vzorčenja izvajala tudi v površinskih tokovih (5,2 %) in vrtinah (2,2 %), drugi tipi vzorčnih mest pa so se pojavljali le pri posameznih sledenjih. Največkrat je bil morebitni pojav sledila spremljan na izviri Ljubljane, če obravnavamo posamezne izvire skupaj, je tam vzorčenje potekalo 225-krat. Od ostalih izvirov je bil kot vzorčno mesto 36-krat vključen izvir Rižana.

Pri 81 % sledilnih poskusov so bila uporabljena fluorescentna sledila (sl. 5). To so organske snovi, ki se zaradi absorpcije svetlobe iz ultravijoličnega dela spektra vzbudijo na molekularnem nivoju in nato oddajajo svetlobo v območju daljših valovnih dolžin (Käss, 1998). Ker so dobro topne v vodi, stabilne z ozirom na kemijo voda, dobro zaznavne tudi v nižjih koncentracijah in večinoma nimajo škodljivega vpliva na kakovost voda, so zelo primerno sledilo, obstajajo pa seveda določene razlike med posameznimi tipi. Najboljše lastnosti ima uranin, ki po uporabi močno prevladuje (med fluorescentnimi 81,3 %, glede na vsa sledila 65,8 %). V manjši meri so v rabi druge vrste sledil, predvsem soli (10 %), bakteriofagi (3,2 %) in obarvani trosi (3,5 %), ki so bili največkrat uporabljeni pri kombiniranih poskusih z istočasnim injiciranjem več različnih sledil. Ko-

ličina uporabljenega sledila se bistveno razlikuje glede na tip sledila, za isto sledilo pa glede na hidrološke razmere, način injiciranja in izdatnost izvirov, v katerih naj bi se po predhodnih ocenah pojavilo. Z razvojem novih naprav, ki danes omogočajo zaznavanje že pri zelo nizkih in prostemu očesu seveda nevidnih koncentracijah, so se zmanjšale tudi količine uporabljenih sledil. Tako na manjših študijskih poligonih zadošča že nekaj gramov sledila, v zaledju večjih kraških izvirov pa ga je še vedno potrebno injicirati tudi več deset kilogramov (Petrič et al., 2020). V zbirki je najmanjša uporabljena količina fluorescentnih sledil 1 g uranina pri sledenju odtoka iz umivalnice v kampu Pivka jama zaradi pojava onesnaženja v curkih prenikle vode v Pivka jami (Kogovšek, 1997), največja pa 100 kg uranina pri sledenju ponikalnice Reke v Škocjanske jame (Mosetti, 1965). Največja količina uporabljene soli je bilo 3200 kg kalijevega klorida pri sledenju ponikalnice Velika voda v Malih Ločah ob vznožju Brkinov. Zanimivo je, da to sledilo ni bilo zaznano v nobenem ob 12 opazovanih izvirov v Sloveniji, Italiji in na Hrvaškem (Krivic et al., 1987).

Najpomembnejša informacija, ki jo dajo sledilni poskusi, je smer podzemnega pretakanja. Glede na značilnosti pojava sledila sta določeni glavna in stranska podzemna vodna zveza, če pa so ugotovljene koncentracije sledila zelo majhne ali je vprašljiva izvedba poskusa, je povezava označena kot nezanesljiva (sl. 6). Če se sledilo ni pojavilo oziroma zaradi tehničnih in drugih omejitev ni bilo zaznano, povezava ni zabeležena/označena. Zanimivo je, da v skoraj polovici točk vzorčenja (44,7 %) sledilo ni bilo zaznano, kar kaže po eni strani na nepredvidljivost podzemnega pretakanja v krasu, na drugi strani pa potrjuje primerno rabo metode sledenj, saj ta predpisuje vzorčenje v vseh točkah, za katere obstaja



Sl. 6. Prikaz deleža opravljenih sledenj glede na ugotovljeni tip povezave (levo) in trajanje vzorčenja (desno).

Fig. 6. Presentation of the proportion of performed tracings according to the defined type of groundwater connection (left) and duration of sampling (right).

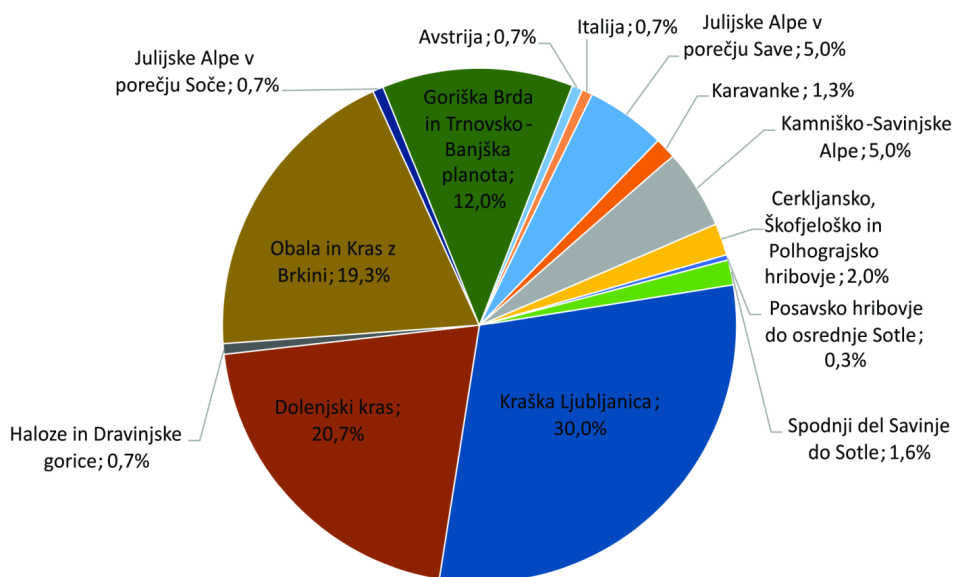
možnost, da se bo sledilo v njih pojavilo. Od dokazanih povezav je bilo 37,3 % glavnih, 8 % pa stranskih. Opredelevitev povezave za nezanesljivo (10 %) ostaja v veliki meri stvar subjektivne ocene izvajalca sledenja, ki najbolje pozna razmere na proučevanem območju in lahko na tej osnovi najbolje ovrednoti dobljene rezultate.

Pri posameznih sledenjih oz. pri posameznih merilnih mestih traja vzorčenje različno dolgo. Odvisno je predvsem od značilnosti vodonosnika, razdalje od točke injiciranja, padavinskih in hidroloških razmer. Pomembno pa je, da pri vzorčenju vztrajamo dovolj dolgo, da dobimo povrnjen zadosten delež injiciranega sledila. V ta namen poleg koncentracij sledila merimo tudi količino vode, ki to sledilo nosi (običajno merimo pretok izvira ali vodnega toka), kar nam omogoči izračun količine sledila, ki je bila zaznana na določenem merilnem mestu. Običajno ga izražamo kot delež povrnjenega sledila v odstotkih glede na količino injiciranega sledila. V zbirki so za sledenja, kjer je bila ta informacija na voljo, dodani tudi podatki o deležu povrnjenega sledila in trajanju vzorčenja. Vrednosti so zelo različne, brez bolj podrobnega pregleda značilnosti območja sledenja in dobljenih rezultatov pa jih ni možno primerno komentirati. Zato samo za primerjavo navajamo podatke o trajanju vzorčenja (sl. 6). Krajša sledenja trajajo manj kot teden dni (11,9 %), približno v tretjini primerov (33,6 %) je vzorčenje trajalo do 1 meseca, kar pri polovici (50,3 %) pa je vzorčenje potekalo do 6 mesecev. Redki so poskusi s trajanjem do 1 leta (2,9 %) ali več (1,4 %). Posebej velja omeniti sledenje prenikle vode skozi 100 m debel strop rovov v Postojnski jami, ki je trajalo več kot 11 let (Kogovšek & Petrič, 2014). Izsledki so potrdili raznolikost prenosa snovi skozi vadozno cono kraških vodonos-

nikov in opozorili na dolgotrajnost zadrževanja morebitnega onesnaženja v njej.

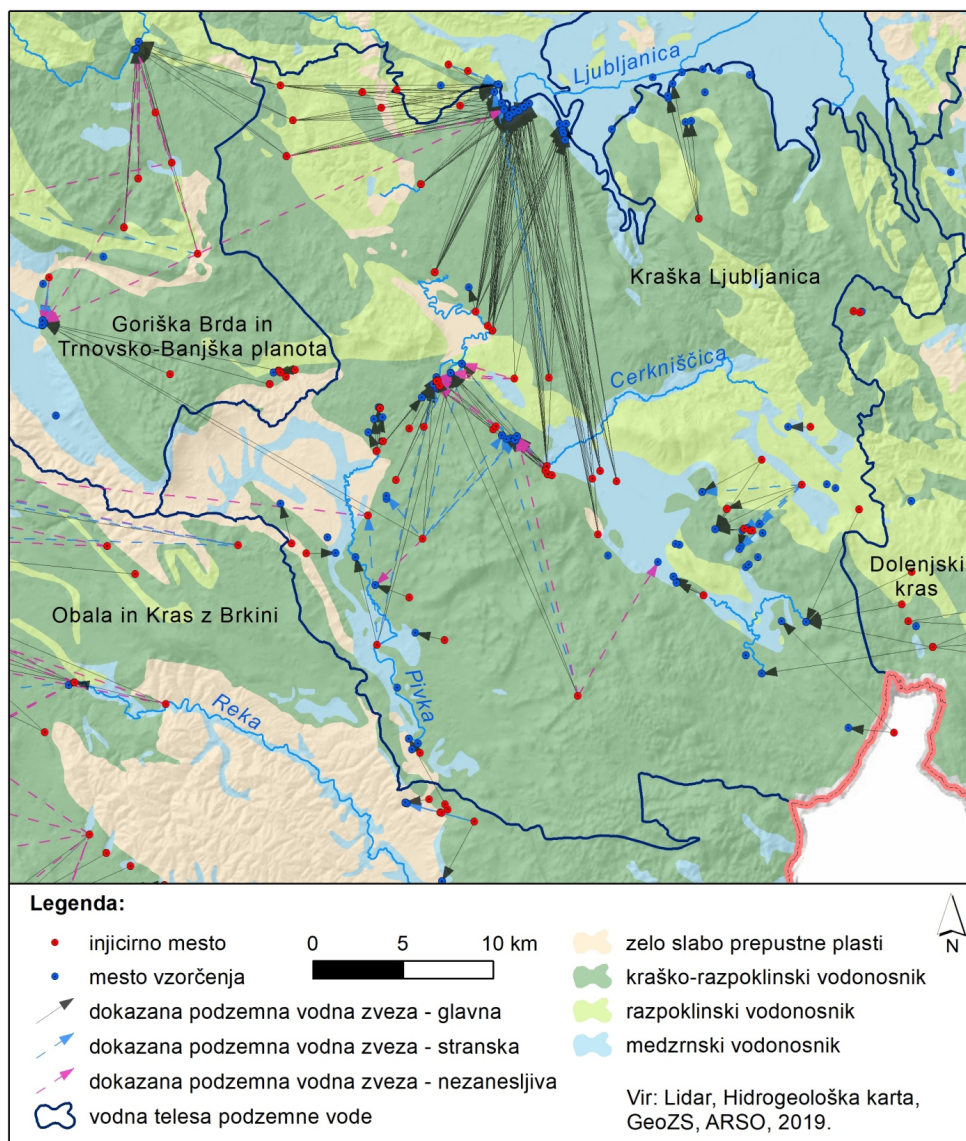
Običajno pa s sledilnimi poskusi ugotavljamo precej višje hitrosti pretakanja vode v krasu. Navidezne hitrosti določamo na osnovi primerjave med zračno razdaljo od točke injiciranja do točke pojava sledila in časom med trenutkom injiciranja in pojavom sledila. Pri tem ločimo med maksimalno (čas glede na prvi pojav sledila nad mejo določljivosti) in dominantno hitrostjo (čas glede na maksimalno zabeleženo koncentracijo sledila). Ugotovljene navidezne hitrosti so zelo odvisne od hidroloških pogojev in neposredna primerjava med njimi ni možna. Pri starejših poskusih, kjer ne razpolagamo z vsemi rezultati sledenj in so izsledki podani bolj opisno, tudi ni vedno znano, ali so podane navidezne maksimalne ali dominantne hitrosti. Pri sledenjih, za katere so na voljo potrebni podatki, je bila največja navidezna dominantna hitrost 1325 m/h ugotovljena za povezavo med ponorom Pivke v Postojnsko jamo in Pivko jamo (Šerko, 1946), najmanjša 0,002 m/h pa pri sledenju skozi nezasičeno cono v dolomitu nad Karavanskim predorom (Kogovšek et al., 2013).

Zgoraj opisana analiza predstavlja le nekatere izmed možnih rab postavljenih zbirke rezultatov sledenj podzemne vode v krasu, možnosti za bolj podrobne in usmerjene analize je še veliko več. Podane so le nekatere osnovne informacije o značilnostih izvedbe in rezultatov sledenj, za bolj podrobno analizo in uporabo rezultatov posameznih sledenj je potrebno poiskati dodatne informacije. V ta namen so zbirki v pdf obliki priložena vsa dostopna, objavljena in neobjavljena poročila (skupaj za 72 % vseh sledenj), ki jih lahko uporabnik v Atlasu okolja odpre s klikom na navedeni vir podatka. Ta možnost daje zbirki dodatno



Sl. 7. Prikaz deleža sledenj (glede na položaj točk injiciranja) po posameznih vodnih telesih podzemne vode.

Fig. 7. Presentation of the proportion of performed tracings (according to the location of sampling points) by individual groundwater bodies.



Sl. 8. Hidrogeološka karta z dokazanimi podzemnimi vodnimi zvezami za vodno telo podzemne vode Kraška Ljubljana.

Fig. 8. Hydrogeological map with proved groundwater connections for the groundwater body Kraška Ljubljana.

Legenda/Legend:

injicirno mesto / injection point, mesto vzorčenja / sampling point, dokazana podzemna vodna zveza-glavna / proved groundwater connection-main, dokazana podzemna vodna zveza-stranska / proved groundwater connection-secondary, dokazana podzemna vodna zveza-nezanesljiva / proved groundwater connection-uncertain, vodna telesa podzemne vode / groundwater bodies, zelo slabo prepustne plasti / low permeability layers, kraško-razpoklinski vodonosnik / karst-fissured aquifer, razpoklinski vodonosnik / fissured aquifer, medzrnski vodonosnik / intergranular aquifer. Vir / Source: Lidar / lidar, Hidrogeološka karta / Hydrogeological map, GeoZS / Geological Survey of Slovenia, ARSO / Slovenian Environment Agency).

pomembnost, saj omogoča zelo hiter dostop do izvirnih virov podatkov in ustrezno ovrednotenje rezultatov posameznih sledilnih poskusov.

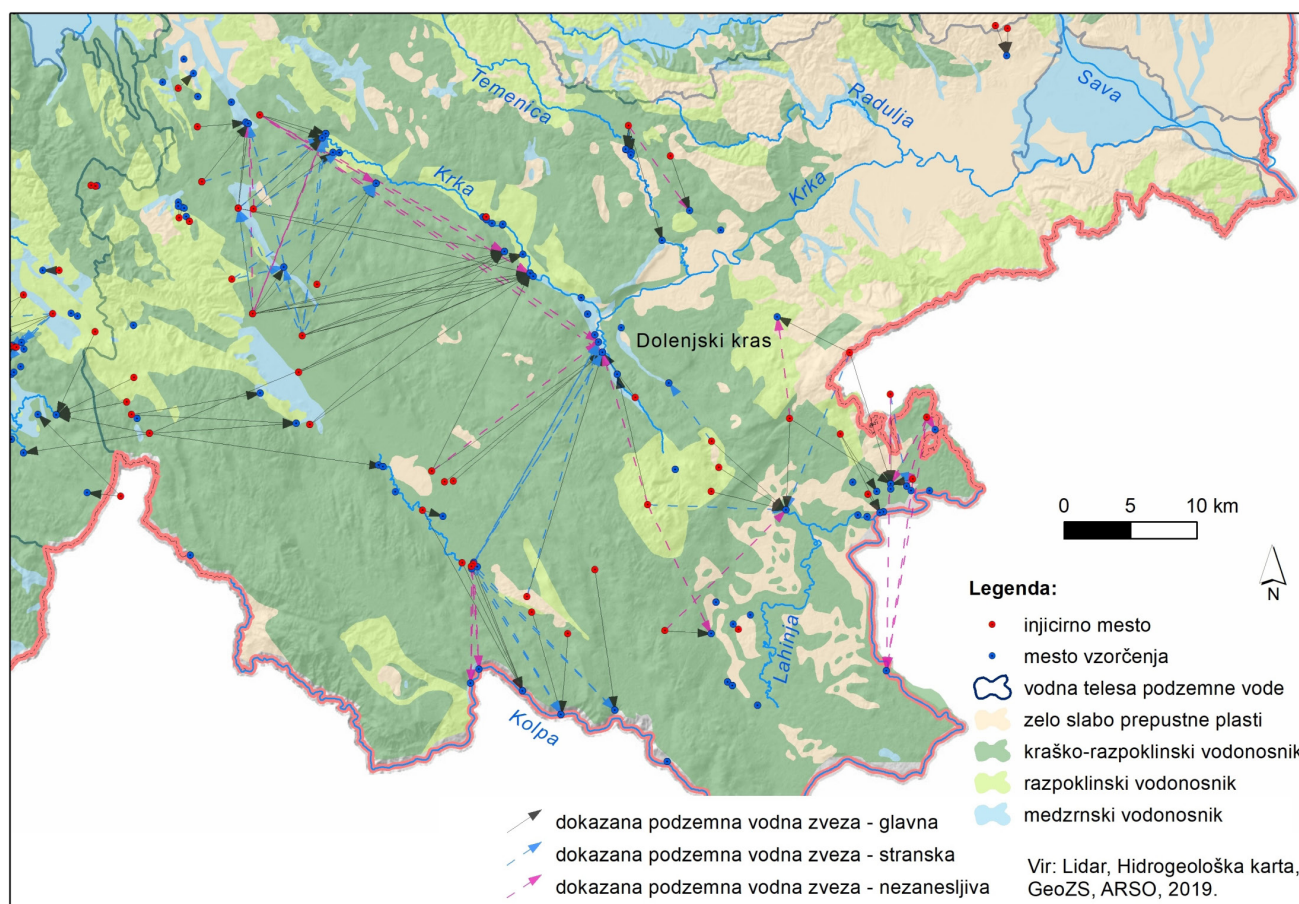
Sledilni poskusi in vodna telesa podzemnih vod

Postavljena zbirka podatkov omogoča tudi analizo prostorske razporeditve opravljenih sledilnih poskusov. Slovenija je razdeljena na 21 vodnih teles podzemne vode, od tega jih je 16 s prevladujočo kraško-razpoklinsko poroznostjo. Ocena razporeditve sledenj znotraj teh pokaže (sl. 7), da je bilo največ injiciranj izvedenih na območju vodnega telesa podzemne vode Kraška Ljubljana (30 %), sledita Dolenjski kras (20,7 %) ter Obala in Kras z Brkini (19,3 %), pogosta so bila sledenja na območju Goriških Brd in Trnovsko-Banjske planote (12 %) ter Julijskih Alp v porečju Save (5 %) in Kamniško-Savinjskih Alp (5 %). Redka so bila sledenja v vodnih telesih Cerkljansko, Škofjeloško in Polhograjsko hribovje (2 %), Spodnji del Savinje do Sotle (1,7 %), Karavanke (1,3 %), Haloze in Dravinjske gorice (0,7 %), Julijske Alpe v porečju Soče (0,7 %) in Posavsko hribovje do osrednje Sotle (0,3 %). Pod-

zemni tok proti izvirom v Sloveniji je bil dokazan tudi z injiciranjem sledil izven naših meja v Avstriji (0,7 % ali 2 injiciranja) in Italiji (0,7 %). Pri vseh 4 poskusih z injiciranjem izven Slovenije je bil dokazan čezmejni značaj vodonosnikov s pretakanjem podzemne vode prek administrativnih meja. Podobno so bile pri injiciranju sledil na območju Slovenije pri 20 poskusih ugotovljene podzemne vodne zveze z izviri v Italiji in pri 5 sledenjih z izviri na Hrvaškem.

Na slikah 8-12 so prikazane podzemne vodne zveze za posamezna vodna telesa podzemne vode. Pomembna ugotovitev sledilnih poskusov je, da so sosednja vodna telesa hidrološko povezana in se voda pretaka podzemno tudi preko njihovih meja.

Največ sledilnih poskusov je bilo izvedenih v vodnem telesu Kraška Ljubljana, predvsem v neposrednem zaledju Ljubljane (sl. 8), ki jo sestavlja več izvirov z različnimi imeni. Več sledenj je potrdilo območja bifurkacij (odtekanje z določene točke proti različnim izvirov) na razvodju med jadranskim in črnomořskim povodjem (hidrološka povezava z vodnima telesoma



Sl. 9. Hidrogeološka karta z dokazanimi podzemnimi vodnimi zvezami za vodno telo podzemne vode Dolenjski kras.

Fig. 9. Hydrogeological map with proved groundwater connections for the groundwater body Dolenjski kras (for the Legend description see caption of Fig. 8).



Sl. 10. Hidrogeološka karta z dokazanimi podzemnimi vodnimi zvezami za vodno telo podzemne vode Obala in Kras z Brkini.

Fig. 10. Hydrogeological map with proved groundwater connections for the groundwater body Obala in Kras z Brkini (for the Legend description see caption of Fig. 8).

Goriška Brda in Trnovsko-Banjška planota ter Obala in Kras z Brkini), pa tudi pretakanje vode med vodnima telesoma Kraška Ljubljana in Dolenjski kras.

V vodnem telesu Dolenjski kras so sledenja večinoma potekala v zaledju izvirov ob reki Krki, nekaj pa tudi na Kočevskem, v Beli Krajini in v porečju Temenice (sl. 9).

Vodno telo Obala in Kras z Brkini je še posebej zanimivo zaradi svojega čezmejnega značaja, saj podzemne vode s tega območja med Tržaškim in Kvarnerskim zalivom pretežno odteka proti izvirov v Italiji in na Hrvaškem (sl. 10). Številne so bile tudi raziskave v zaledju izvira Rižane, ki je glavni vir za oskrbo obalnih občin s pitno vodo.

Znotraj vodnega telesa Goriška Brda in Trnovsko-Banjška planota so sledilni poskusi pokazali, da moramo Trnovsko-Banjško planoto obravnavati kot enotni hidrogeološki sistem, v katerem se prepletajo prispevna zaledja pomembnejših vodnih virov na njenem obrobju (sl. 11). Na vzhodnem robu vodnega telesa pa ostajajo odprta vprašanja o položaju jadransko-črnomske razvodnice.

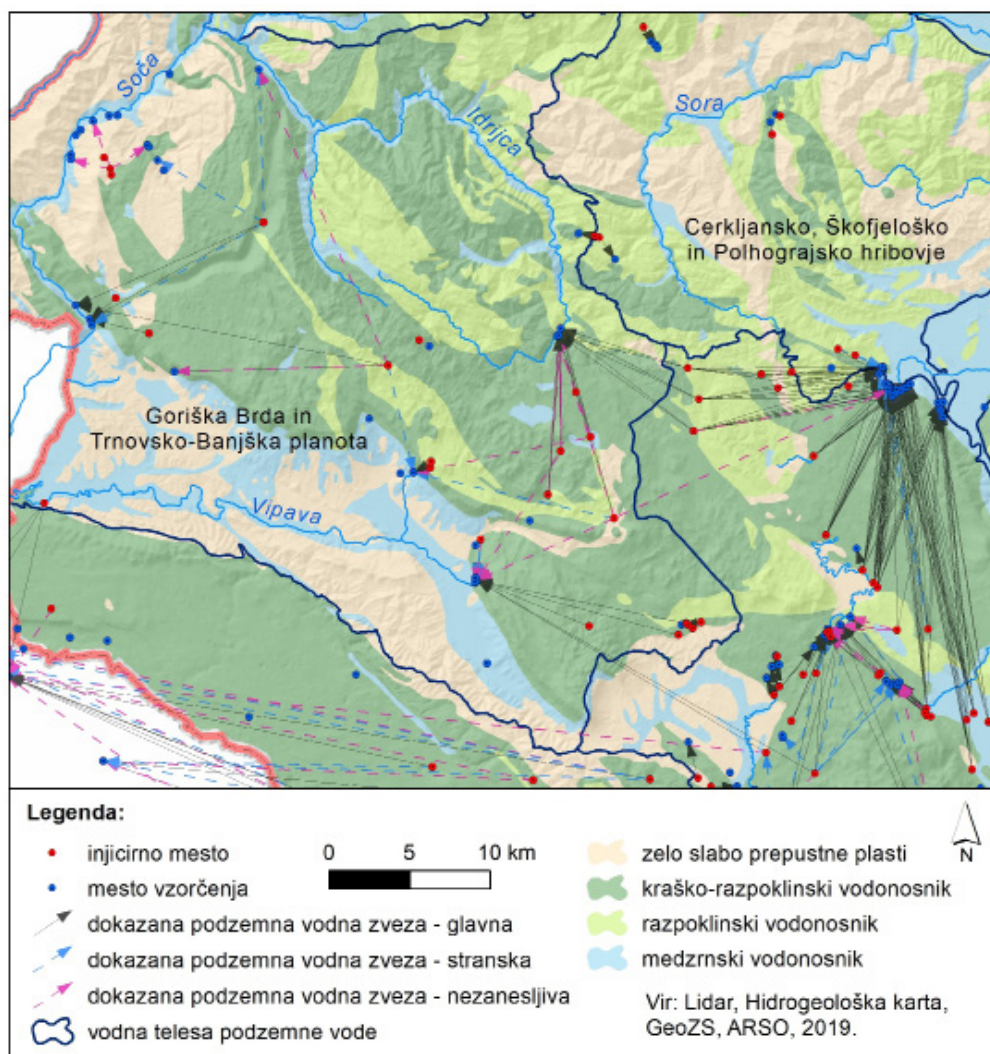
V vodnem telesu Cerkljansko, Škofjeloško in Polhograjsko hribovje prevladujejo razpoklinski vodonosniki, v katerih so bila zaradi narave toka v teh sistemih izvedena le sledenja na krajših razdaljah (sl. 11).

Na območju Julijskih Alp so številna sledenja potrdila bifurkacijsko območje na razvodju med Sočo in Savo, s tem pa tudi med jadranskim in črnomsrim povodjem (sl. 12). Dokaj dobro je raziskano tudi območje Kaninskega pogorja. Številna sledenja v osrednjem delu Kamniško-Savinjskih Alp so dokazala prepletanje hidrogeoloških zaledij Kamniške Bistrice in Savinje. V Karavankah so podatki omejeni na območje Pece z značilnostmi čezmejnega vodonosnika.

V severovzhodnem delu Slovenije je delež kraških in razpoklinskih vodonosnikov majhen, posamična sledenja pa so bila običajno izvedena v sklopu usmerjenih, aplikativnih projektov.

Predlog novih sledenj

Opravljeni sledilni poskusi so pripomogli k boljšemu poznavanju značilnosti pretakanja vode in prenosa snovi v različnih delih Slovenije.



Sl. 11. Hidrogeološka karta z dokazanimi podzemnimi vodnimi zvezami za vodni telesi podzemne vode Goriška Brda in Trnovsko-Banjska planota ter Cerkljansko, Škofjeloško in Polhograjsko hribovje.

Fig. 11. Hydrogeological map with proved groundwater connections for the groundwater bodies Goriška Brda in Trnovsko-Banjska planota and Cerkljansko, Škofjeloško in Polhograjsko hribovje (for the Legend description see caption of Fig. 8).

Za nekatera območja pa je podatkov malo in bi jih bilo potrebno pridobiti z izvedbo novih sledilnih poskusov. Čeprav je bilo na območju vodnega telesa Kraška Ljubljana opravljenih največ sledenj, ostajajo odprta vprašanja o položaju razvodnice predvsem na območju Hrušice in Snežnika ter smereh pretakanja podzemne vode v zaledju potokov Iška in Želimeljščica. Na Dolenjskem krasu ostajajo bele lise v zaledju zgornjega in spodnjega toka Kolpe, na območju med Krko in Temenico ter na Gorjancih. Dobrodošla bi bila sledenja voda z območja zahodnega, predvsem pa z vzhodnega dela Suhe krajine ter Goteniške gore. V zbirki tudi ni podatkov o morebitnih sledilnih poskusih v zaledju zajetja Jezero v Družinski vasi, ki je pomemben vodni vir za oskrbo območja Novega mesta.

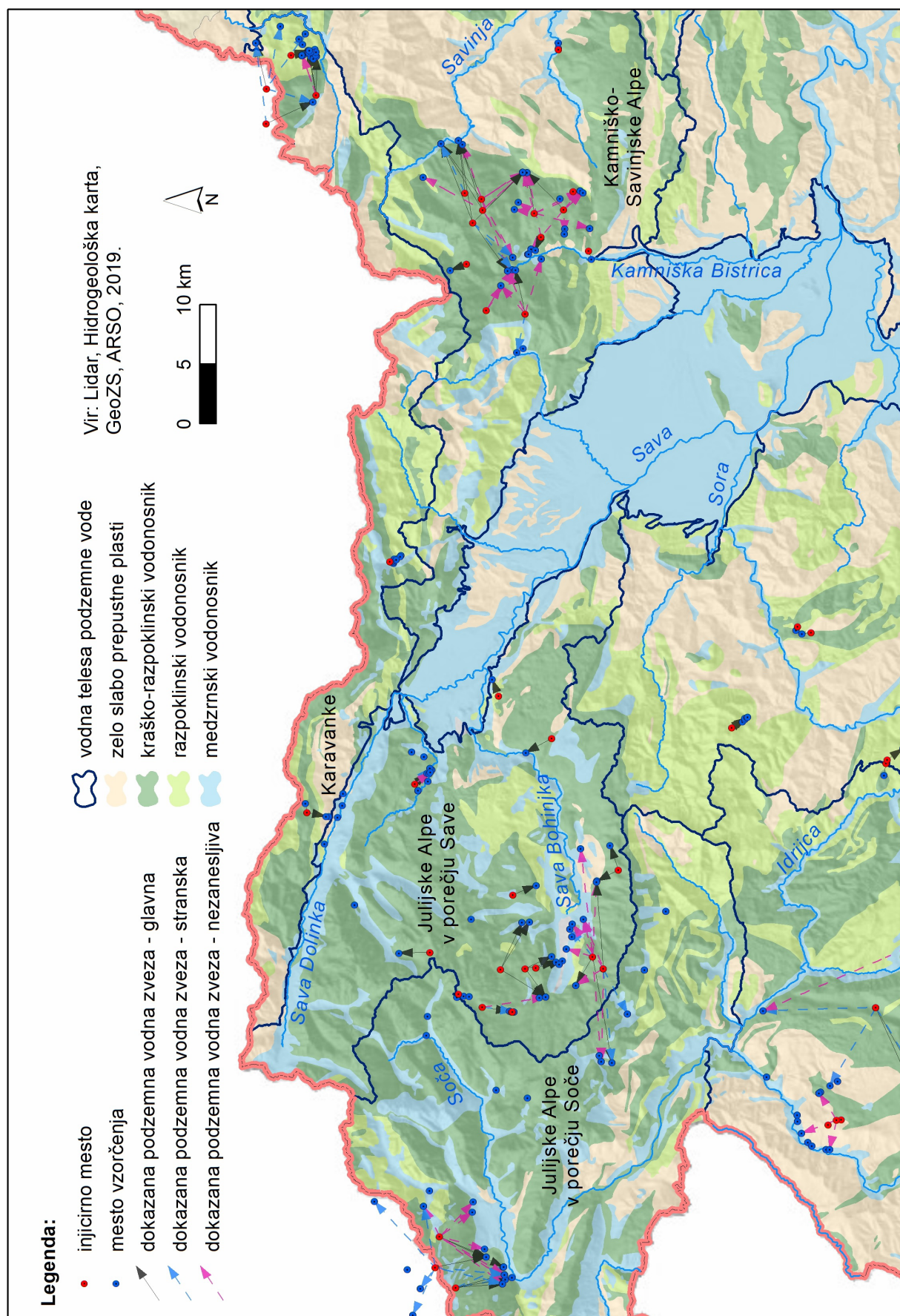
V vodnem telesu Obala in Kras z Brkini bi bila koristna dodatna sledenja na Snežniku ter na območju Vremščice in Košanske doline za določitev jadransko-črnomoške razvodnice, brez izvedenih sledenj pa je zaenkrat tudi goriški del Krasa. V Goriških Brdih ni bilo opravljenih nobenih sledenj, enako velja znotraj vodnega telesa Gori-

ška Brda in Trnovsko-Banjska planota za Idrijsko-Cerkljansko hribovje, Šentviško goro in Hrušico.

V vodnem telesu Kamniško-Savinjske Alpe so bele lise hribovje na levem bregu Save, Menina planina, Golte in Raduha. Na območju Julijskih Alp v porečju Save bi bila koristna dodatna sledenja na Pokljuki, Jelovici in Kobli. Še več neznank je v porečju Soče, kjer so bila sledenja izvedena le na Kaninu ter v zaledju izvirov Tolminke in Zadlaščice. V vodnem telesu Karavanke je nekaj več podatkov o značilnostih podzemnega pretakanja samo na območju Pece, kjer je bilo opravljenih več sledilnih poskusov.

V vodnem telesu Cerkljansko, Škofjeloško in Polhograjsko hribovje prevladujejo raspoklinski vodonosniki, v katerih so dejansko izvedljiva le sledenja na krajših razdaljah. Načrtovanje novih sledenj je zato vezano na pojav posameznih problemov v zvezi z rabo ali varovanjem virov podzemne vode. Podobno velja tudi za vodna telesa v severovzhodnem delu Slovenije, v katerih je delež kraških in raspoklinskih vodonosnikov majhen.

Seveda pa tudi za marsikatero območje, kjer so že bili izvedeni sledilni poskusi, velja, da bi



Sl. 12. Hidrogeološka karta z dokazanimi podzemnimi vodnimi zvezami za vodna telesa podzemne vode v visokogorskem delu Slovenije.

Fig. 12. Hydrogeological map with proved groundwater connections for the groundwater bodies in the high mountain part of Slovenia (for the Legend description see caption of Fig. 8).

bilo potrebno nekatere izmed njih ponoviti zaradi manj zanesljivih rezultatov. Ali pa ga za boljše poznavanje značilnosti pretakanja podzemne vode in prenosa snovi izvesti še ob drugačnih hidroloških razmerah. Ugotovljene značilnosti se namreč lahko ob nizkih in visokih vodostajih precej razlikujejo.

Še bolj kot prostorska pokritost Slovenije z ugotovljenimi podzemnimi vodnimi zvezami pa je pomemben doprinos rezultatov sledilnih poskusov k uspešnemu reševanju okoljske problematike in k zanesljivejšemu ocenjevanju stanja podzemne vode. V tem pogledu bi bilo potrebno glede na izkušnje ARSO nove sledilne poskuse načrtovati z naslednjimi cilji:

- določitev smeri in značilnosti toka podzemne vode in prenosa snovi v vplivnem območju točkovnih in razpršenih virov onesnaževanja (npr. čistilne naprave, odlagališča, vojaška vadišča, kmetijstvo, urbanizacija),
- določitev smeri in značilnosti toka podzemne vode in prenosa snovi zaradi varovanja virov pitne vode in ekosistemov (ugotavljanje kemijskega stanja vodnih teles podzemne vode),
- nadgradnja obstoječe podatkovne zbirke rezultatov sledenja toka podzemne vode z določitvijo hidrogeoloških zaledij izvirov, ki so v zbirko vključena kot mesta vzorčenja.

Sklepi

Urejeni in prosto dostopni podatki o vodah lahko predstavljajo pomemben element sodobnega prostorskega načrtovanja, trajnostnega upravljanja z vodnimi viri, varovanja pred naravnimi nesrečami in odgovornega odnosa do okolja. Primer tovrstne predstavitve obstoječega znanja je izdelana podatkovna zbirka rezultatov sledenja toka podzemne vode na slovenskem krasu, ki je javno dostopna v Atlasu okolja (Internet 3). Omogoča hiter in enostaven način dostopa do informacij o toku podzemne vode in prenosu snovi tako raziskovalcem kot tistim, ki so zadolženi za razvoj, sprejemanje in izvedbo okoljskih ukrepov, pa tudi širši javnosti, ki jo kraške vode zanimajo. Zelo koristna je lahko v procesu celovitega upravljanja s kraškimi vodnimi viri, še posebej v primerih neposredne nevarnosti onesnaženja ob izrednih dogodkih, ki zahteva hitro in učinkovito ukrepanje.

V zbirko so trenutno vključeni rezultati 231 sledenj, ki so bila izvedena med leti 1905 in 2019. Prav gotovo je bilo opravljenih še več poskusov, za katere poročil nismo uspeli dobiti. Zato je v procesu dopolnjevanja zbirke smiselno nadaljevati s pridobivanjem informacij o izvedenih

poskusih tudi s poizvedovanjem pri različnih potencialnih izvajalcih sledenj v preteklosti, izvajalce novih sledenj pa vzpodbujati k sprotnemu objavljanju izsledkov v strokovnih publikacijah. V načrtu je obnavljanje in dopolnjevanje zbirke vsaki dve leti.

Seveda pa je potrebno rezultate privzemati z določeno mero kritičnosti, saj je predvsem pri starejših sledenjih, ko je bila metoda še v razvoju, težko oceniti kakovost izvedbe, slabše so bile tudi tehnične možnosti za redni odvzem vzorcev in natančno določanje koncentracij sledil. Pomemben del zbirke so zato priloženi viri podatkov (članki, poglavja v knjigah, prispevki na konferencah, poročila) v pdf obliki, v katerih lahko uporabnik pridobi bolj podrobne informacije o izvedbi in rezultatih sledenja ter s tem oceni tudi kakovost in uporabnost podatka v zbirki.

V preteklosti je bilo treba za izvedbo sledenja pridobiti dovoljenje na ARSO, sedaj pa te zahteve ni več in načrtovanje poskusa je bolj enostavno. Pokazala pa se je tudi velika slabost take ureditve, saj je sedaj možno, da več izvajalcev istočasno izvede poskus z enakim sledilom v zaledju nekega izvira. V takem primeru bodo rezultati sledenj nezanesljivi in zato verjetno neuporabni. Zato predlagamo, da se na ustrezen način (npr. s sprejetjem pravilnika) spet vzpostavi zahteva po pridobitvi dovoljenja ter zagotovi strokovno pravilno izvedbo sledilnih poskusov. Poleg predhodnega obveščanja o namenu sledenja bi bila seveda za obnavljanje in dopolnjevanje izdelane podatkovne zbirke zelo koristna tudi pobuda o sporočanju podatkov o izvedbi in rezultatih poskusov njenemu skrbniku.

Zahvala

Projektni nalogi Podatkovna zbirka rezultatov sledenja toka podzemne vode v Sloveniji in Dopolnitev podatkovne zbirke rezultatov sledenja toka podzemne vode v Sloveniji za podporo ukrepom NUV2: OS3.2b2 in OS6 je financirala Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO; št. pogodb 2551-17-500005 in 2551-19-700026). Program Raziskovanje krasa P6-0119, v okviru katerega sta potekala zbiranje podatkov in priprava članka, je sofinancirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna. Za pomoč pri zbiranju podatkov o sledenjih, ki so jih izvedli ARSO, Geološki zavod Slovenije in Geologija d.o.o. Idrija se zahvaljujemo Petru Frantarju, Urši Pavlič, Petri Meglič, Andreju Lapanjetu, Ines Piščanec, Janku Urbancu in Jožetu Janežu. Pri oblikovanju zbirke podatkov na IZRK sta sodelovali tudi študentki na praksi Aleksandra Privšek in Jana Tomažič.

Viri in literatura

- Bat, M. & Uhan, J. 2003: Vodno bogastvo Slovenije. Ministrstvo za okolje, prostor in energijo, Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana: 131 p.
- Behrens, H., Beims, U., Dieter, H., Dietze, G., Eikmann, T., Grummt, T., Hanisch, H., Henseling, H., Käß, W., Kerndorff, C., Leibundgut, C., Müller-Wegener, U., Rönnefahrt, I., Scharenberg, B., Schleyer, R., Schloz, W. & Tilkes, F. 2001: Toxicological and ecotoxicological assessment of water tracers. *Hydrogeology Journal*, 9: 321–325. <https://doi.org/10.1007/s100400100126>
- Benischke, R., Goldscheider, N. & Smart, C.C. 2007: Tracer techniques. In: Goldscheider, N. & Drew, D. (eds.): *Methods in Karst Hydrogeology*, Taylor and Francis, 147–170.
- Ford, D. & Williams, P.D. 2007: *Karst hydrogeology and geomorphology*. John Wiley & Sons, Chichester: 562 p.
- Gams, I. 1965: Aperçu sur l'hydrologie du karst Slovine et sus communications souterraines. *Naše jame*, 7/1–2: 51–60.
- Gams, I. 2004: *Kras v prostoru in času*. Založba ZRC, Ljubljana: 515 p.
- Goldscheider, N., Meiman, J., Pronk, M. & Smart, C. 2008: Tracer tests in karst hydrogeology and speleology. *International Journal of Speleology*, 37: 27–40. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.37.1.3>
- Habič, P. 1989: Sledenje kraških voda v Sloveniji. *Geografski vestnik*, 61: 3–20.
- Käss, W. 1998: *Tracing technique in geohydrology*. A.A. Balkema, Brookfield, Rotterdam: 579 p.
- Knop, A. 1878: Über die hydrographischen Beziehungen zwischen der Donau und der Aachquelle im badischen Oberlande. *Neues Jahrbuch Für Mineralogie, Geologie und Paläontologie*: 350–363.
- Kogovšek, J. 1997: Water tracing tests in vadose zone. In: Kranjc, A. (ed.): *Tracer hydrology 97*, Balkema: 167–172.
- Kogovšek, J. & Petrič, M. 2014: Solute transport processes in a karst vadose zone characterized by long-term tracer tests (the cave system of Postojnska Jama, Slovenia). *Journal of Hydrology*, 519: 1205–1213. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.08.047>
- Kogovšek, J., Petrič, M. & Mulec, J. 2013: Dodatek k poročilu in poročilo „Sledilni poskus na vodnem telesu podzemnih voda Karavanke (Presušnik – Karavanški predor)“. Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU: 2+21 p.
- Kranjc, A. 2000: Karst water research in Slovenia. *Acta Carsologica*, 29/1: 117–125.
- Krivic, P., Bricelj, M., Trišić, N. & Zupan, M. 1987: Sledenje podzemnih vod v zaledju izvira Rižane (Slovenija, NW Jugoslavija). *Acta Carsologica*, 16: 83–104.
- Meglič, P., Lapajne, A., Piščanec, I. & Urbanc, J. 2019: Dopolnitev podatkovne zbirke rezultatov sledenja toka podzemne vode v Sloveniji. *Geološki zavod Slovenije*: 61 p.
- Mosetti, F. 1965: Nuova interpretazione di un esperimento di marcatura radioattiva del Timavo. *Bolletino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 7/27: 218–243.
- Müller, F. 1891: Resultate der Färbung des Höhlenflusses Reka im Karst mit Fluorescein. *Mitt Dt Bodenkundl Ges*, 25: 221–232.
- Novak, D. 1990: Novejša sledenja kraških voda v Sloveniji po letu 1965. *Geologija*, 33: 461–478. <https://doi.org/10.5474/geologija.1990.012>
- Petrič, M. 2009: Pregled sledenja voda z umetnimi sledili na kraških območjih v Sloveniji. *Geologija*, 52/1: 127–136. <https://doi.org/10.5474/geologija.2009.013>
- Petrič, M., Ravbar, N. & Gostinčar, P. 2018: Podatkovna zbirka rezultatov sledenja toka podzemne vode v Sloveniji. Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU: 41 p. + priloge.
- Petrič, M., Ravbar, N. & Gostinčar, P. 2019: Dopolnitev podatkovne zbirke rezultatov sledenja toka podzemne vode v Sloveniji za podporo ukrepom NUV2: OS3.2b2 IN OS6a. Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU: 13 p. + priloge.
- Petrič, M., Ravbar, N., Gostinčar, P., Krsnik, P. & Gacin, M. 2020: GIS database of groundwater flow characteristics in carbonate aquifers: tracer test inventory from Slovenian karst. *Appl. Geogr.*, 118: 102191. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102191>
- Šerko, A. 1946: Barvanje ponikalnic v Sloveniji. *Geografski vestnik*, 18: 125–139.
- Timeus, G. 1928: Nei misteri del mondo sotterraneo. *Alpi Giulie*, 29: 1–38.
- Internetni viri:
 Internet 1: <https://gisportal.gov.si/portal/apps/webappviewer/index.html?id=11785b60a-cdf4f599157f33aac8556a6> (3.11.2019)
 Internet 2: http://gis.arso.gov.si/evode/profile.aspx?id=atlas_voda_LidarŽArso (3.11.2019)
 Internet 3: http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso