PROGRAM RAZVOJA PODEŽELJA
Evropski kmetijski sklad za razvoj podeželja: Evropa investira v podeželje
CLLD
LAS Zgornje Savinjske in Šaleške doline

ZNANSTVENORAZISKOVALNI CENTER SLOVENSKE AKADEMIJE ZNANOSTI IN UMETNOSTI

Inštitut za raziskovanje krasa, Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti,
Karst Research Institute, Research Centre of the Slovenian Academy of Sciences and Arts
Titov trg 2, SI - 6230 Postojna, Slovenia, T. +386 5 700 19 00, F. +386 5 700 19 99 E. izrk@zrc-sazu.si, kras.zrc-sazu.si/

Št. 45/127-1/20

10. junija 2020

POROČILO O HIDROGEOLOŠKIH RAZISKAVAH IZVIROV REČICE IN NJUNEGA PRISPEVNEGA ZALEDJA

Financer: **Evropska unija iz Evropskega kmetijskega sklada za razvoj podeželja**
Republika Slovenija iz Programa razvoja podeželja

Izvajalec: **Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti, Inštitut za raziskovanje krasa**
Novi trg 2, 1000 Ljubljana

Izdelali: dr. Nataša Ravbar, univ. dipl. geografinja in sinologinja,
dr. Metka Petrič, univ. dipl. inž. geologije,
dr. Matej Blatnik, univ. dipl. geograf,
Astrid Švara, mag. inž. geologije,

Sodelavci: Franjo Drole, geodetski tehnik,
Mateja Zadel, laboratorijska tehnica,
Blaž Kogovšek, univ. dipl. inž. vki.

Predstojnik
Dr. Tadej Slabe

Postojna, junij 2020

VSEBINA

1. UVOD 3

2. OPIS OBMOČJA 4

3. METODOLOGIJA 8

3.1. PRIDOBIVANJE PODATKOV IZ JAVNO DOSTOPNIH VIROV 8

3.2. GEOLOŠKO KARTIRANJE 8

3.3. HIDROLOŠKE MERITVE 9

3.3.1. Zvezne in občasne meritve 10

3.3.2. Hidrometrične meritve 13

3.4. IZVEDBA DVEH SLEDILNIH POSKUSOV 15

4. ANALIZE PRIDOBLJENIH PODATKOV 20

4.1. IZDELAVA PRETOČNIH KRIVULJ, IZRAČUN VODOSTAJEV IN PRETOKOV 20

4.2. IZRAČUN KOLIČINE POVRNJENEGA SLEDILA 25

4.3. IZDELAVA HIDROGEOLOŠKE KARTE 25

5. REZULTATI 26

5.1. GEOLOŠKO KARTIRANJE 26

5.2. ZVEZNE IN OBČASNE MERITVE NA IZVIRIH 29

5.2.1. Pretočne razmere 29

5.2.2. Značilnosti temperature in specifične električne prevodnosti izvirske vode 33

5.3. SLEDILNA POSKUSA 37

5.5. HIDROGEOLOŠKA KARTA 40

6. SKLEPI 42

7. ZAHVALA 43

8. VIRI IN LITERATURA 43

1. UVOD

Izvira Rečice Župnekovo žrelo in Žegnan studenec sta bila v preteklosti zajeta za oskrbo s pitno vodo. Za njuno varovanje je bila izdelana hidrogeološka študija zaledja (Mencej in Marinko, 1978), na tej osnovi pa sprejet Odlok o varstvenih pasovih vodnega vira Župnekovo žrelo in Žegnani studenec (Uradni list RS, 1987). Zaradi zdravstvene oporečnosti vode iz izvirov predvsem po intenzivnejšem deževju, sta bila v 90-ih letih prejšnjega stoletja izključena iz javnega sistema oskrbe s pitno vodo. Prebivalci naselij Rečica, Dol-Suha in Pirhovo so ostali brez skupnega vira pitne vode. Posledično se morajo prebivalci območja Dol-Suha oskrbovati iz lastnih vodnih virov. Ostalim je omogočena priključitev na vodni vir Letošč, ki se nahaja na nasprotni strani Savinje. Iz tega vodnega vira je vodo za uporabnike celotnega območja Občine Rečica ob Savinji na desnem bregu Savinje potrebno prečrpavati iz nižje ležečih Nazarij.

Na podlagi določil Uredbe o oskrbi s pitno vodo (Uradni list RS, 2012), ki upravljavcem in lastnikom vodovodnih služb nalaga zagotovitev rezervnih vodnih virov, je bil leta 2019 sprejet projekt Trajnostno zagotavljanje endogenih vodnih virov – Žegnan studenec, ki ga financirata Evropska unija iz Evropskega kmetijskega sklada za razvoj podeželja ter Republika Slovenija iz Programa razvoja podeželja.

Cilj projekta je preučiti, ali bi omenjena izvira Rečice lahko ponovno vključili v javni sistem oskrbe s pitno vodo vsaj za del prebivalcev Občine Rečica ob Savinji. S tem namenom je Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU prevzel nalogo hidrogeoloških raziskav izvirov in njunega prispevnega območja. Ker pretekle raziskave niso upoštevale možnosti podzemnega zatekanja hudourniške Suhe k izviroma, na kar je opozorila študija Geološkega zavoda leta 1991 (Novak, 2002), je bila izdelana podrobna raziskava obsega in hidrogeoloških značilnosti prispevnega zaledja ter proučevanih izvirov.

Študija je zajemala ugotavljanje:

- velikosti in razprostranjenosti zaledja izvirov,
- geoloških in hidrogeoloških značilnosti v zaledju izvirov,
- hidroloških značilnosti izvirov ter
- smeri, hitrosti in načina pretakanja podzemnih voda v zaledju.

Delo je potekalo na podlagi pregleda literature, javno dostopnih podatkov, geološkega kartiranja, zveznega spremljanja fizikalno-kemijskih lastnosti vode, občasnih hidrometričnih meritev, vodne bilance in dveh sledilnih poskusov. Prvi sledilni poskus je hkrati del dokumentarno-izobraževalne oddaje Ugriznimo znanost, ki jo bralci lahko najdejo v spletnem arhivu RTV Slovenija pod naslovom Po sledeh kraških voda. Delni preliminarni rezultati raziskav so bili objavljeni v občinskem glasilu (Ravbar et al., 2019).

V poročilu smo povzeli poglavitne značilnosti izvirov Rečice in prispevnega zaledja, izdelali hidrogeološko karto obravnavanega območja ter predstavili stopnjo ranljivosti izvirov na onesnaženje.

2. OPIS OBMOČJA

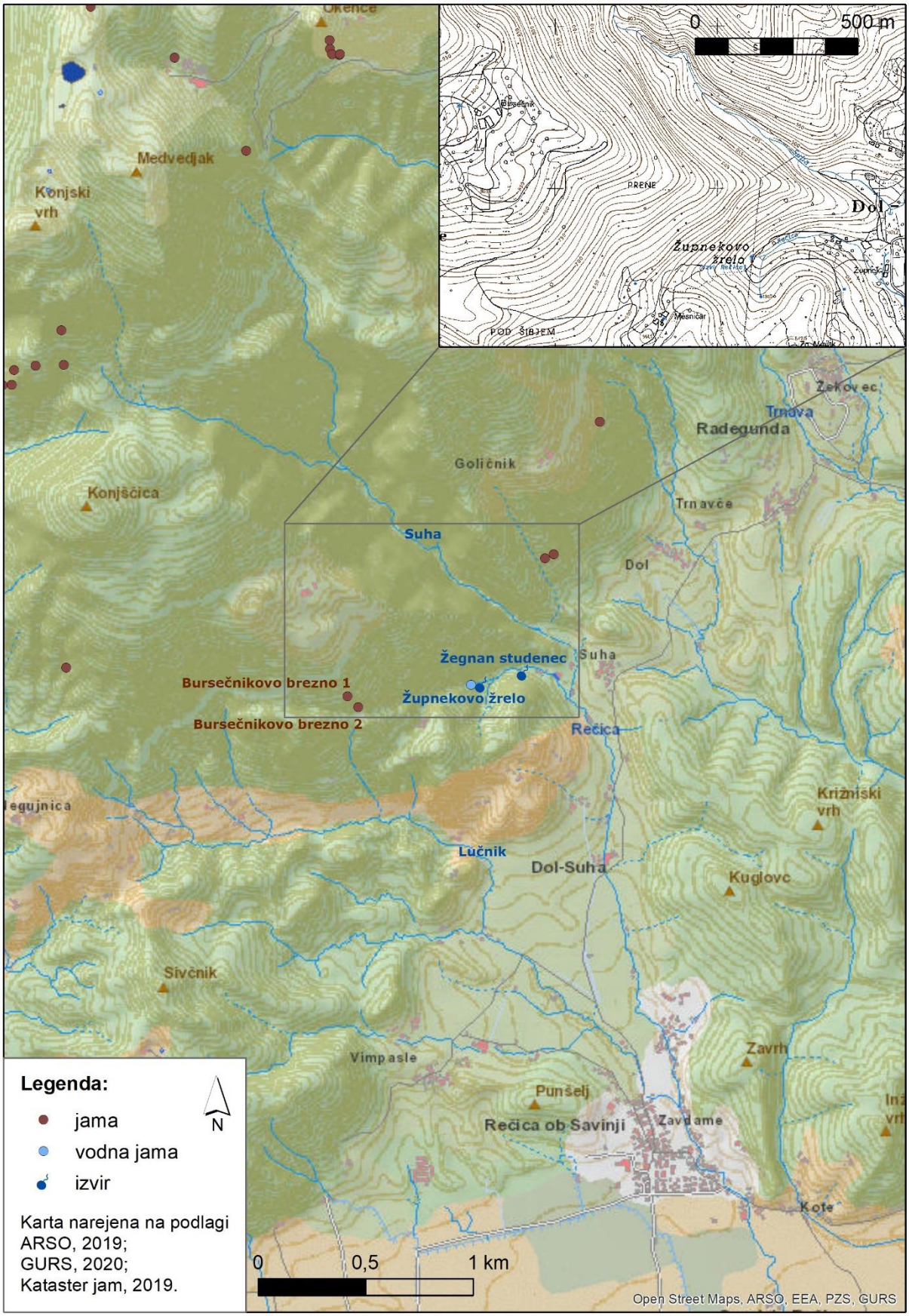
Izvira se nahajata v manjši zatrepni dolini nad naseljem Dol-Suha pod Goltmi severovzhodno od Rečice ob Savinji. Župnekovo žrelo je 21 m dolga in 6 m globoka kraška jama (Župnjakova žrela – Mesničar, Kat. št. 4190; Kataster jam, 2019). Voda izvira pod vhodom v jamo na nadmorski višini 445 m, le občasno, po obilnem deževju bruha skozi približno 5 m višji jamski vhod. Ob izviru je bil v preteklosti zgrajen vodovodni jašek, ki ga za zajetje še vedno uporablja bližnja ribogojnica. Z desne strani se v strugo steka voda, ki zbira vodo v grapi, ki vodi do kmetije Mesničar. Zaradi majhne vodnatosti smo ga poimenovali Curek.

Okoli 200 m dolvodno od Župnekovega žrela tik ob strugi potoka iz manjših razpok, deloma prav tako zagrajenih za potrebe oskrbe z vodo, izvira Žegnan studenec. Izvir se nahaja na nadmorski višini 429 m. Rečici se z leve strani iz sosednje grape pridruži hudourniški potok Suha. Ta se iz dveh povirnih krakov na pobočju Golt steka po ozki soteski. Običajno je njena struga suha, saj ponika vzdolž toka (Slike 1–6).

Slika 1: Župnekovo žrelo po obilnem deževju, ko voda izvira iz jame.

Slika 2: Curek se z desne priključi toku iz Župnekovega žrela.

Slika 3: Izvir Žegnanega studenca prekrit z jaškom zajetja tik ob strugi Rečice.



Slika 4: Topografska karta obravnavanega območja.

Slika 5: Po obilnem deževju Suha priteče iz soteske in se steka v Rečico.

Slika 6: Pogled na Rečico ob Savinji, Golte v ozadju.

Pobočja Golt se do višine okoli 1550 m strmo dvigajo nad naselje Dol-Suha. Večina neposrednega zaledja izvirov Rečice je kraškega in ga prekriva gozd. Na jugozahodu se na višini 560 m nahaja manjša domačija Mesničar, ki je od Župnekovega žrela oddaljena 300 m zračne razdalje, od Žegnanega studenca pa 490 m. Severozahodno od izvirov je večja kmetija Bursečnik, ki je spomladi 2020 imela 143 mater ovac (te jagnjijo skozi vse leto enkrat do dvakrat) in dve kobili. Nahaja se na nadmorski višini 890 m in je od Župnekovega žrela oddaljena 900 m, od Žegnanega studenca pa 1 km zračne razdalje. Na obravnavanem območju so poznane še naslednje več kot deset metrov globoke oziroma dolge jame: Bursečnikovo brezno 1 in 2 (Kat. št. 4886 in 4887), Jama pod hotelom (Kat. št. 6037) ter Brezno pri Jurju 1 in 2 (Kat. št. 8699 in 8700; Kataster jam, 2019).

3. METODOLOGIJA

3.1. PRIDOBIVANJE PODATKOV IZ JAVNO DOSTOPNIH VIROV

Proučevanje zaledja izvirov Rečice smo začeli s pregledovanjem dosedanjih raziskav, ki so bile narejene na tem območju. Na voljo je bilo več virov, ki so predstavljali osnovo za nadaljnje raziskave:

- kartografsko gradivo (ARSO, 2019; GURS, 2019; 2020),
- speleološke informacije (Kataster jam, 2019),
- geološke informacije (Buser et al., 1967; Novak, 2002),
- hidrogeološke podlage za varovanje (Mencej in Marinko, 1978),
- Odlok o varstvenih pasovih vodnega vira Župnekovo žrelo in Žegnani studenec (Uradni list RS, 1987).

Pomemben vir informacij za našo raziskavo so bile pretekle in sedanje zvezne hidrološke in meteorološke meritve, ki jih izvaja Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO, 2020a,b). Žal neposredno na vodotoku Rečica ni nobene hidrološke postaje. Najbližje se tovrstne merilne postaje nahajajo na sosednjih, bolj vodnatih vodotokih Savinja, Dreta, Paka in Bolska, ki so nam služile zgolj za orientacijo o hidroloških razmerah na tem območju.

V neposredni bližini Rečice ob Savinji se na meteorološki postaji Radegunda izvajajo meteorološke meritve, ki med drugim beležijo meritve temperature zraka in količine padavin. Ne izvajajo pa meritev pritiska zraka in evapotranspiracije, ki ju pri naših raziskavah potrebujemo za izračunavanje vodostajev in vodne bilance. Uporabili smo meritve pritiska zraka, ki ga najbližje Rečici ob Savinji izvajajo na meteorološki postaji Celje – Medlog, medtem ko je najbližja postaja z meritvami evapotranspiracije Trojane – Limovce.

3.2. GEOLOŠKO KARTIRANJE

Na podlagi Osnovne geološke karte SFRJ v merilu 1:100.000 s tolmačem za list Ravne na Koroškem (Buser et al. 1967; eGeologija, 2019), pregleda LiDAR posnetkov (ARSO, 2019) in

temeljnih topografskih kart v merilu 1:10.000 (GURS, 2019) smo na terenu izvedli temeljno geološko kartiranje proučevanega območja do nadmorske višine okoli 1400 m. Namen kartiranja je bil določiti prostorsko razprostranjenost posameznih litoloških enot, njihovih stičišč in osnovnih tektonskih deformacij (Slika 7). Nastala karta je bila osnova za izdelavo hidrogeološke karte.

S sledenjem litoloških stikov in preverjanjem litoloških značilnosti s pomočjo geoloških in geodetskih pripomočkov (geološko kladivo Estwing, geološki kompas Freiberg 8819, 10 % HCl kislina, Garmin GPS map 62s) smo sproti beležili spremembe na terenu. Kjer je bilo možno, smo zabeležili naklone in vpade kamninskih plasti ter glavnih strukturnih elementov.

Po zbranih terenskih podatkih smo v programu ArcMap 10.6.1 izdelali natančno geološko karto pregledanega območja.

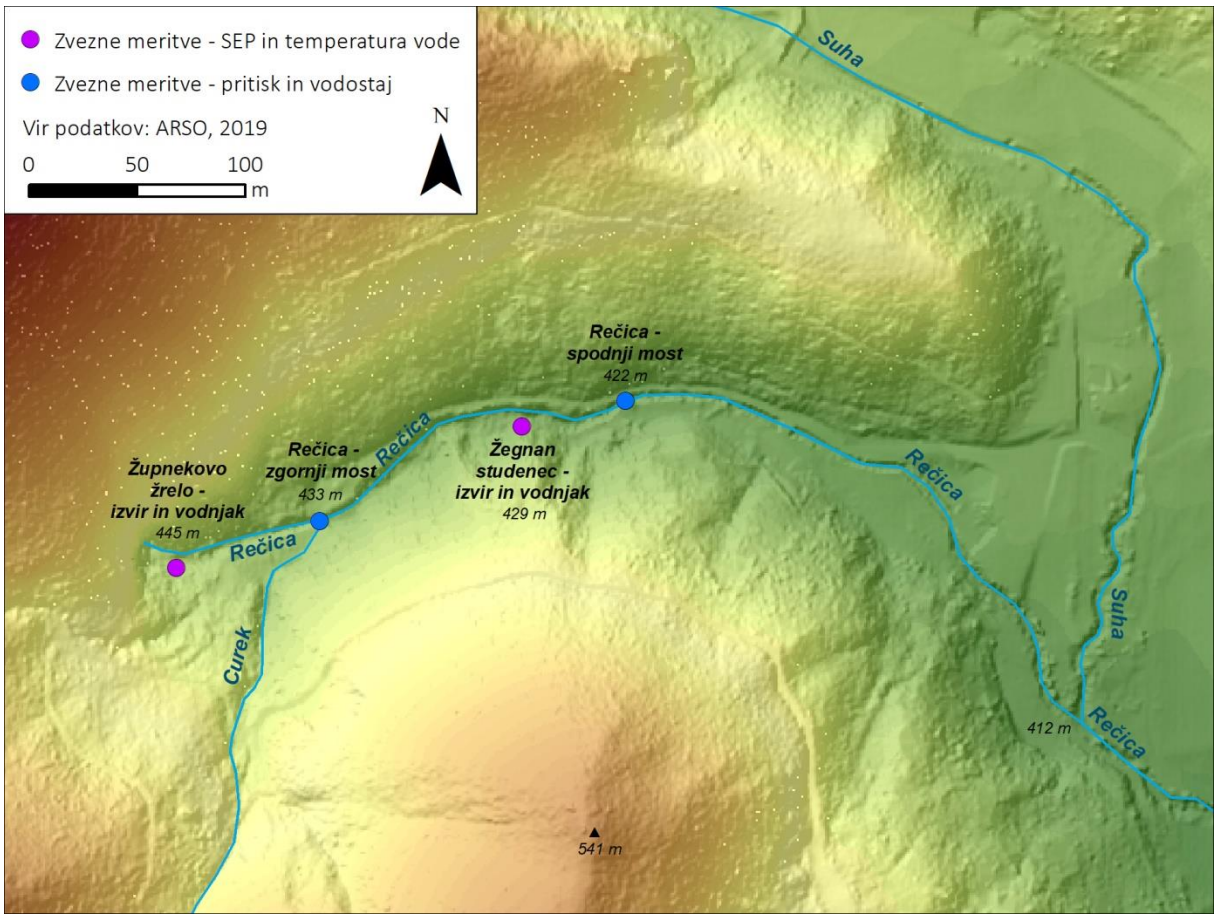
Slika 7: Merjenje vpadov plasti v sklopu geološkega kartiranja na terenu.

3.3. HIDROLOŠKE MERITVE

V sklopu hidroloških meritev smo januarja 2019 vzpostavili zvezne meritve vodostajev, temperature in specifične električne prevodnosti vode, izvedli občasna ročna merjenja teh parametrov in hidrometrične meritve.

3.3.1. Zvezne in občasne meritve

Zvezne meritve pritiska, temperature in specifične električne prevodnosti (SEP) vode smo vzpostavili na štirih mestih, tako da smo spremljali fizikalno-kemijske lastnosti vode na iztoku iz vodonosnika (tj. na izvirih) ter poskušali pridobiti informacije o količinah vode, ki izteka iz posameznega izvira (Žegnan studenec in Župnekovo žrelo). Temperaturo in specifično električno prevodnost vode smo merili v vodnjaku izvira Župnekovo žrelo ter v vodnjaku izvira Žegnan studenec. Pritisk (oziroma posredno višino vodostajev) smo merili v zatrepni dolini izvirov Rečice, pod zgornjim in spodnjim mostom čez Rečico, imenovanem Rečica – zgornji most in Rečica – spodnji most. Natančne lokacije merilnih mest smo določili s pomočjo LiDAR podatkov (ARSO, 2019) in inštrumenta GNSS Rover Leica GS18T (Slika 8 in Preglednica 1).



Slika 8: Lokacije merilnih mest pritiska (vodostaja), temperature in specifične električne prevodnosti vode.

Slika 9: Meritve pritiska (vodostaja) na Rečici pod zgornjim (levo) in spodnjim mostom (desno).

Slika 10: Meritve specifične električne prevodnosti in temperature vode v vodnjakih pri Župnekovem žrelu (levo) in Žegnanem studencu (desno).

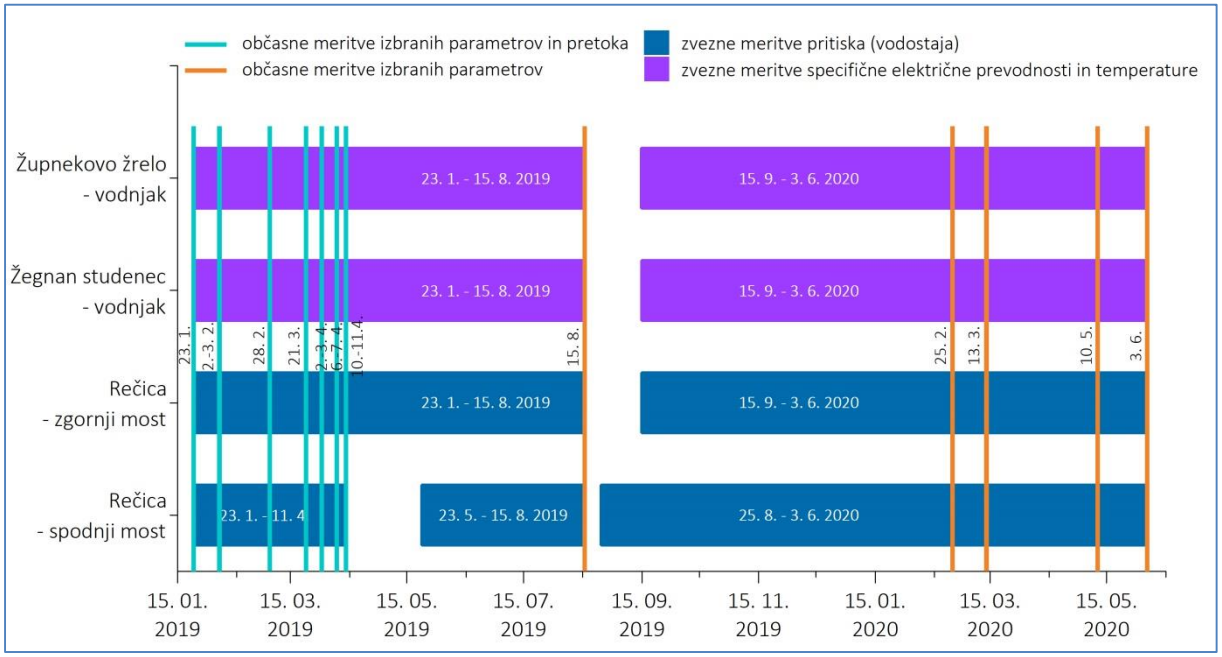
Preglednica 1: Seznam merilnih mest, njihove lokacije in merjeni parametri.

Merilno mesto	**Lega (koordinate in nadmorska višina)**	**Merjeni parametri**
Župnekovo žrelo (vodnjak)	Y = 493586 X = 133284 Z = 445 m	specifična električna prevodnost in temperatura vode
Žegnan studenec (vodnjak)	Y = 493746 X = 133349 Z = 429 m	specifična električna prevodnost in temperatura vode
Rečica – zgornji most	Y = 493652 X = 133306 Z = 433 m	pritisk (vodostaj)
Rečica – spodnji most	Y = 493795 X = 133361 Z = 422 m	pritisk (vodostaj)

Za zvezne meritve smo uporabili samodejne merilnike Onset HOBO (ONSET Comp, 2020a,b). Tip merilnika U20 smo uporabili za meritve pritiska (Slika 9), pri čemer smo uporabili različico, ki ima razpon meritev pritiska ekvivalentu 4 m vodnega stolpca, resolucijo 0,14 cm in natančnost 0,3 cm. Tip merilnika U24 smo uporabili za meritve temperature in specifične električne prevodnosti vode (Slika 10). Tu je razpon meritev temperature med –2 in 36 °C, resolucija meritev 0,01 °C in natančnost 0,1 °C. Razpon meritev specifične električne prevodnosti je med 0 in 10.000 µS/cm, resolucija 1 µS/cm, natančnost pa se uravnava z naknadno kalibracijo z ročnimi meritvami (ONSET Comp, 2020b).

Zvezne meritve so trajale med 23. januarjem 2019 in 3. junijem 2020. Časovni interval med posameznimi meritvami je bil 15 minut. Podatke smo redno odčitavali (21. marca 2019, 11. aprila 2019, 15. avgusta 2019, 25. februarja 2020, 13. marca 2020, 10. maja 2020 in 3. junija 2020; Slika 11), pri čemer smo dvakrat naleteli na težave s prenašanjem podatkov. Posledično je v poletnem času prišlo do izpada podatkov za naslednja obdobja:

- Žegnan studenec (vodnjak): med 15. avgustom in 15. septembrom 2019,
- Župnekovo žrelo (vodnjak): med 15. avgustom in 15. septembrom 2019,
- Rečica – zgornji most: med 15. avgustom in 15. septembrom 2019,
- Rečica – spodnji most: med 11. aprilom in 23. majem ter med 15. in 25. avgustom 2019.



Slika 11: Prikaz obdobij zveznih ter občasnih meritev izbranih parametrov in pretoka vode.

Slika 12: Merjenje specifične električne prevodnosti vode in temperature z merilnikom WTW Cond 330i (zgoraj) za umerjanje meritev s samodejnih merilnikov.

Občasne ročne meritve so obsegale meritve temperature, specifične električne prevodnosti in temperature vode (Slika 12). Meritve smo opravljali z merilnikoma WTW MultiLine Multi 3620 IDS in WTW Cond 330i (Xylem Analytics, 2020). Glavni namen meritev je bila natančna izmera izbranih parametrov vode za kasnejšo kalibracijo zveznih meritev. Ročne meritve smo opravljali na vseh mestih, kjer so postavljeni samodejni merilniki, za primerjavo pa dodatno še na dveh pritokih (Curek in Suha).

3.3.2. Hidrometrične meritve

Z namenom, da bi lahko proučevana izvira količinsko ovrednotili, smo vrednosti izmerjenih vodostajev s pomočjo izračuna odvisnosti oz. funkcijske zveze med občasno merjenimi pretoki in sočasno izmerjenim vodostajem pretvorili v pretoke. Meritve smo opravili v različnih hidroloških razmerah (nizek, srednji in visok vodostaj) in s tem pridobili čim večji razpon izmerjenih vrednosti. Meritve smo opravili z metodo raztapljanja soli (Käss, 1998). Pri tem smo na izbranem mestu v vodotok injicirali slano raztopino z znano količino soli, na drugem mestu dolvodno (dovolj oddaljenem, da se je vlita raztopina dobro zmešala z ostalo vodo v strugi) pa smo zvezno merili specifično električno prevodnost in/ali slanost vode, dokler celotna

mešanica ni odtekla. Iz sprememb teh dveh parametrov v času in znane količine injicirane soli smo izračunali pretok vode na izbranem mestu.

Za merjenje in izračun pretokov smo uporabili dve vrsti inštrumentov. Eden od načinov je bil z uporabo ročnih merilnikov specifične električne prevodnosti s samodejnim beleženjem vrednosti (WTW MultiLine Multi 3620 IDS) in naknaden izračun vrednosti z računalnikom. Ta je bila izračunana na podlagi spremembe izmerjene prevodnosti, trajanja povišane koncentracije in količine uporabljene soli, kot prikazuje enačba 1. Drugi način je bil uporaba ročnega merilnika slanosti (MADD Technologies EasyFlow), ki izračun pretoka opravi samodejno na podoben način iz sprememb v izmerjeni slanosti (Slika 13).

Enačba 1: Postopek za izračun pretoka iz zveznih meritev specifične električne prevodnosti vode (SEP).

$$Q = \frac{M}{\sum(SEP_t - SEP_0) * CF * t_{int}}$$

Q = pretok vode (L/s)

M = masa soli (g)

$\sum(SEP_t - SEP_0)$ = vsota razlik med izhodiščno (SEP_0) in kasnejšo (SEP_t) prevodnostjo (µS/cm)

CF = koeficient med prevodnostjo in koncentracijo soli (0,5)

t_{int} = časovni interval med posamičnimi meritvami prevodnosti (s)

V primeru manjše izdatnosti izvira, ko so bile razmere za merjenje pretokov na opisan način ocenjene kot manj zanesljive, smo meritve pretoka opravili tudi z uporabo vedra ali soda ter štoparice. V tem primeru smo vedro podstavili pod brzico / kanal / pipo tako, da smo lahko zajeli celotno količino vode in merili toliko časa, dokler nismo napolnili želene količine. Iz razmerja med količino (L) in porabljenim časom (s) smo izračunali pretok (L/s).

Meritve pretoka smo opravili na naslednjih mestih:

- Curek; pred sotočjem z Rečico; merjenje z vedrom ali sodom,
- Rečica – zgornji most; dolvodno od sotočja Rečice in Curka; merjenje s soljo,
- Rečica – spodnji most; dolvodno od sotočja Rečice z Žegnanim studencem; merjenje s soljo,

- Vodohran – del vode, ki je preusmerjen iz Žegnanega studenca; merjenje z vedrom,
- Suha – gorvodno od sotočja z Rečico, pred ponorom in ob iztoku iz soteske; merjenje s soljo.

Na podlagi večkratnega merjenja pretokov smo izdelali pretočno krivuljo in zvezne meritve vodostajev pretvorili v zvezne vrednosti pretokov obeh proučevanih izvirov.

Slika 13: Merjenje slanosti in samodejno računanje pretoka z ročnim merilnikom MADD Easyflow.

3.4. IZVEDBA DVEH SLEDILNIH POSKUSOV

V času raziskave smo izvedli dva sledilna poskusa. To je pogosto uporabljena hidrološka metoda z uporabo umetnih sledil, ki v krasoslovju nudi najbolj neposredne odgovore na zastavljena vprašanja o podzemnih vodnih povezavah; ugotavljanje smeri, hitrosti in načina pretakanja podzemnih voda proti izvirom (Käss, 1998; Goldscheider in Drew, 2007).

Da bi pridobili informacije o smereh in hitrostih pretakanja ponorne vode Suhe, smo 3. aprila 2019 ob 14:00 v času nizkega vodostaja izvedli sledilni poskus z uporabo toksikološko varnega sledila uranin (Behrens et al., 2001). V ponor Suhe, ki je takrat ponikala s pretokom 1,9 L/s, smo injicirali 20 g uranina (Slika 14).

Slika 14: Injiciranje fluorescentnega sledila uranin v ponikajočo Suho.

Slika 15: Injiciranje fluorescentnega sledila uranin v razpoko ob cesti proti kmetiji Bursečnik.

Zanimalo nas je tudi, ali vode z območja Bursečnikove kmetije odtekajo proti izviroma Rečice. Zato smo v manjšo razpoko ob cesti proti kmetiji Bursečnik 4. marca 2020 ob 12:45 injicirali 50 g uranina (Slika 15). Injiciranje smo izvedli po intenzivnejšem padavinskem dogodku, ko so bili vodostaji v upadanju. Pred, med in po injiciranju smo za pripravo raztopine sledila in spiranje uporabili 2,5 m^3 vode, ki so nam jo dostavili rečiški gasilci.

Na Župnekovem žrelu in Žegnanem studencu smo vodo vzorčili s pomočjo avtomatskih vzorčevalnikov ISCO 6712 (Equipco Services, 2020; Sliki 16 in 17). V času prvega sledilnega poskusa smo v obdobju 48 ur po injiciranju izvira vzorčili vsako uro, kasneje pa vsake 3 ure. V času drugega sledilnega poskusa smo v obdobju 48 ur po injiciranju izvira vzorčili vsaki 2 uri, potem vsake 3 ure. Kasneje smo pogostnost zajemanja prilagajali hidrološkim razmeram in sicer je bila pogostnost manjša ob nizkih vodostajih (enkrat dnevno). Vzporedno so na obeh izvirih potekale zvezne meritve fluorescence z Götschy Optotechnik LLF-M terenskim fluorimetrom v 30-minutnem intervalu (Gotschy, 2020).

Preglednica 2: Lokacije vzorčnih mest.

Vzorčno mesto	**Župnekovo žrelo**	**Žegnan studenec**	**Suha**	**Curek**	**Tišler**
X	493586	493746	493700	493645	493462
Y	133284	133349	133630	133290	132544
Z	445 m	429 m	465 m	437 m	410 m

Preglednica 3: Podatki o injicirnih točkah in načinu injiciranja, zračna ter višinska razdalja do izvirov Rečice in vzorčnega mesta na Suhi.

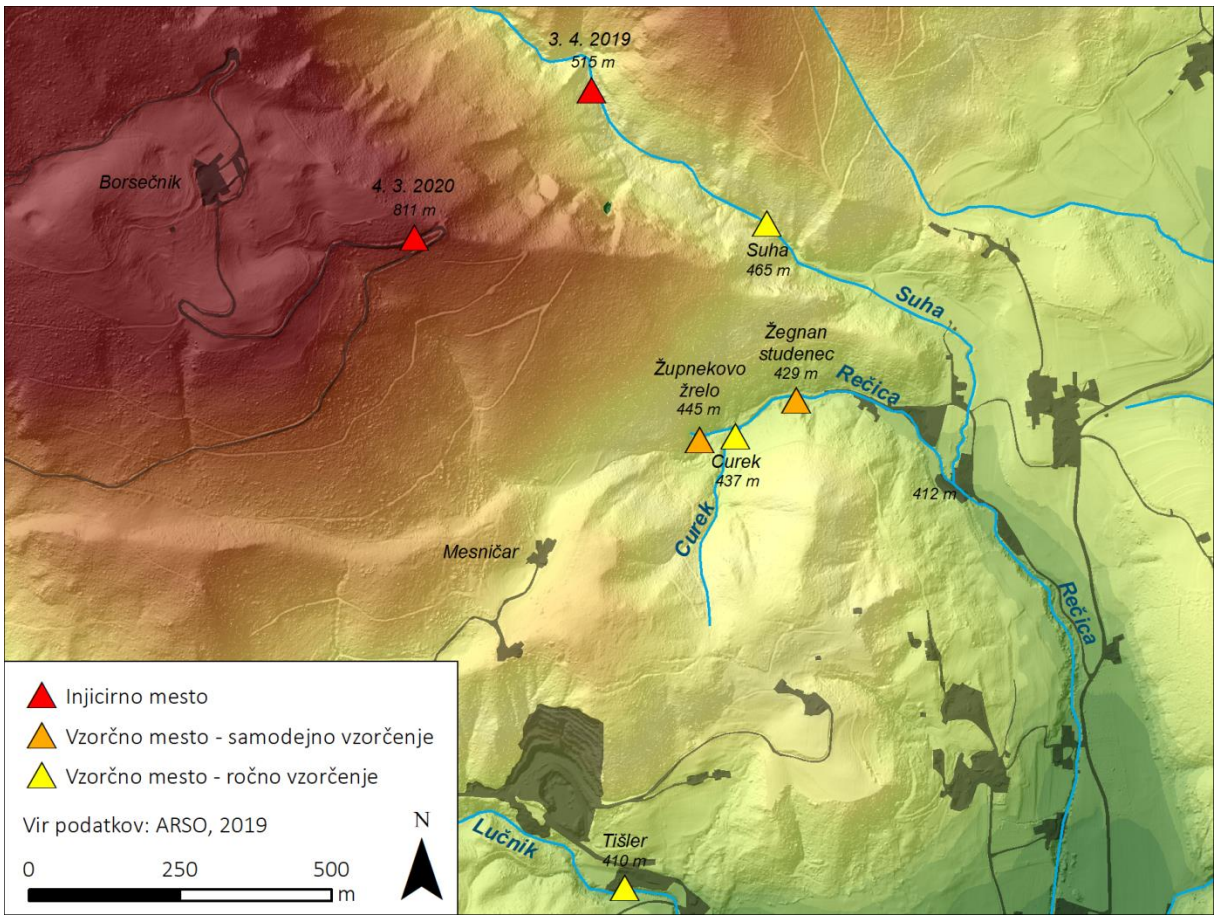
Injicirno mesto		**V strugi Suhe**	**Pod Bursečnikom**
Datum in ura injiciranja		3.4.2019, 14:00	4.3.2020, 12:45
Tip injicirnega mesta		ponikalnica	razpoka
Vrsta in količina sledila		Uranin, 20 g	Uranin, 50 g
X		493408	493115
Y		133861	133616
Z		515 m	811 m
Zračna oddaljenost	**Župnekovo žrelo**	605 m	580 m
	Žegnan studenec	615 m	685 m
	Suha – vzorčno mesto	365 m	585 m
Višinska razlika	**Župnekovo žrelo**	70 m	366 m
	Žegnan studenec	86 m	382 m
	Suha – vzorčno mesto	50 m	346 m

Slika 16: Namestitev raziskovalne opreme za avtomatsko vzorčenje vode in merjenje fluorescence na Žegnanem studencu.

Slika 17: Pretakanje vzorcev vode iz avtomatskih vzorčevalnikov v stekleničke za analize v laboratoriju.

V času prvega sledilnega poskusa smo oba izvira opazovali osem dni, v času drugega pa več kot tri mesece. Poleg tega smo občasno ročno vzorčili (odvisno od padavinskih razmer, enkrat ali dvakrat dnevno) Suho na iztoku iz soteske in Curek pred dotokom v Rečico. V času drugega sledilnega poskusa smo v istem intervalu dodatno vzorčili še potok Lučnik pri Tišlerjevem Pruhu (Tišler).

Lokacije vseh injicirnih in vzorčnih mest, ki smo jih določili s pomočjo LiDAR podatkov (ARSO, 2019) in inštrumenta GNSS Rover Leica GS18T, so prikazane na sliki 18 in navedene v preglednicah 2 in 3. V njih so povzete tudi podrobnosti injiciranja, vzorčenja, zračna ter višinska razdalja do izbranih vzorčnih mest.



Slika 18: Lokacije mest injiciranja in vzorčenja vode v času obeh sledilnih poskusov.

Za ugotavljanje prisotnosti uranina smo vzorce kmalu po zajemu analizirali v laboratoriju Inštituta za raziskovanje krasa ZRC SAZU na luminiscenčnem spektrometru PERKIN ELMER LS 45 pri E_{ex}=491 nm, E_{em}=512 nm (Perkin Elmer, 2020; Käss, 1998; Goldscheider in Drew, 2007). Ker smo v vzorcih, vzetih po intenzivnejših padavinah ugotavljali veliko kalnost, ki predstavlja motnjo pri merjenju fluorescence, smo analize po določenem času, ko so se delci v vzorcih

usedli, ponovili. Na podlagi izmerjenih koncentracij in pretokov v danem času smo ocenili delež povrnjenega sledila.

4. ANALIZE PRIDOBLJENIH PODATKOV

4.1. IZDELAVA PRETOČNIH KRIVULJ, IZRAČUN VODOSTAJEV IN PRETOKOV

Samodejni merilniki ne merijo vodostajev neposredno, ampak absolutno vrednost pritiska. Ta predstavlja vsoto zračnega pritiska in dodatnega pritiska, ki ga povzroči vodni stolpec. Tu 1 bar predstavlja 10,2 m vode. Za natančen izračun vodostaja smo torej izračunali razliko med izmerjenim pritiskom v vodi ter meritvami zračnega pritiska na najbližji in najbolj reprezentativni meteorološki postaji Celje – Medlog. Ker so naše meritve potekale v 15 minutnem intervalu, meritve na uradni meteorološki postaji pa v 30 minutnem, smo pri slednji iz povprečij predhodnih in kasnejših meritev izračunali manjkajoče vrednosti. Izračunane razlike v meritvah pritiska predstavlja pritisk, ki je posledica vodnega stolpca, tega pa smo z uporabo matematične enačbe (Enačba 2) preračunali v vodostaj v centimetrih. Ker med posameznimi merilniki obstajajo določena odstopanja v meritvah, smo izračunano vrednost primerjali z občasno ročno izmerjenimi meritvami globine merilnika in vrednosti po potrebi popravili (Preglednica 4).

Enačba 2: Postopek za izračun vodostaja iz samodejnih meritev pritiska.

$$h = \Delta P \ * 1{,}02$$

h = vodostaj (cm)

ΔP = razlika v izmerjenemu tlaku v vodi in zračnemu tlaku (mbar)

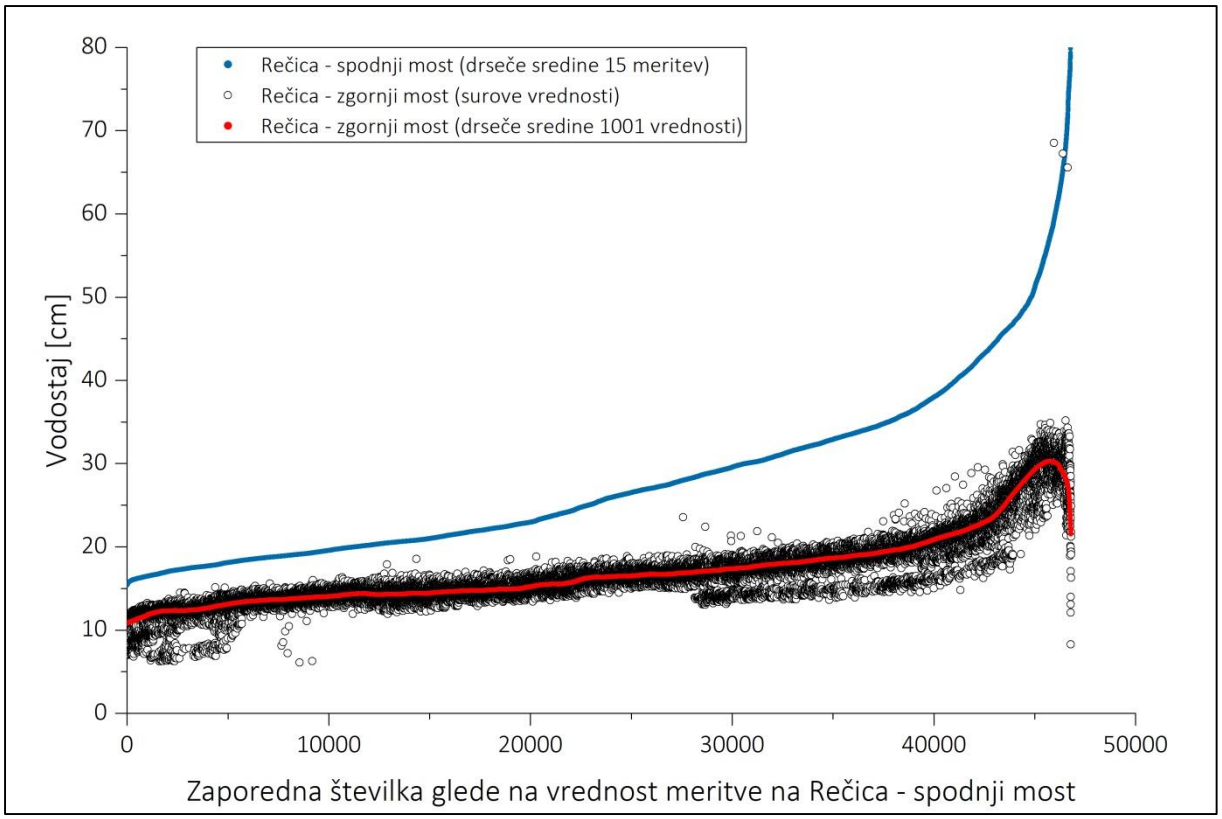
Zaradi za merjenje vodostajev in pretokov neugodnih lastnosti struge Rečice (velik strmec, hudourniški značaj, turbulenten tok), različnih načinov merjenja pretokov, težav z dostopnostjo do izvira Žegnan studenec (posledično neposredne meritve pretokov niso možne) in neznanih količin odvzete vode iz izvirov so surovi podatki meritev vodostajev in pretokov obremenjeni z veliko mero šuma. Posledično preprosta izdelava pretočne krivulje z uporabo eksponentne funkcije odvisnosti pretokov od vodostajev ni bila možna. Ker tudi uporaba funkcij višjega reda in kombinacije večjega števila enačb niso dale zadovoljivih rezultatov, smo šum v meritvah pritiska / vodostaja omilili z glajenjem krivulje (uporaba operacije »drsečih sredin« – računanje povprečij 15 zaporednih vrednosti; Slika 19).

Pri razvrstitvi vseh meritev glede na izmerjen vodostaj na Rečici – spodnji most je nastal precej razpršen oblak meritev z merilnega mesta Rečica – zgornji most (Slika 19). Zanj smo zato prav tako napravili izračun povprečnih vrednosti (1001 zaporedna meritev). S tem smo ustvarili povsem nov niz podatkov, ki je mnogo bolj primerljiv.

Preglednica 4: Rezultati meritev pretoka na posameznih merilnih mestih v različnih hidroloških razmerah.

Datum in merjene lastnosti	**Rečica – zgornji most**	**Curek**	**Rečica – spodnji most**	**Vodohran**	**Suha**
23.1.2019 (ura)	11:00	/	11:30	13:00	/
- pretok (L/s)	2,1		11,1	0,2	
- globina merilnika (cm)	14		22	/	
2.2.2019 (ura)	21:30	21:45	21:00	/	/
- pretok (L/s)	746	10	1029		
- globina merilnika (cm)	/	/	/		
3.2.2019 (ura)	8:15	8:20	7:45	/	9:45
- pretok (L/s)	1139	12	1535		122
- globina merilnika (cm)	/	/	/		/
28.2.2019 (ura)	/	10:30	11:00	10:40	/
- pretok (L/s)		0,1	11,8	1,6	
- globina merilnika (cm)		/	/	/	
21.3.2019 (ura)	12:30	/	12:00	/	/
- pretok (L/s)	1,2		22,4		
- globina merilnika (cm)	15		35		
2./3.4.2019	2.4.2019	/	2.4.2019	3.4.2019	3.4.2019
(ura)	(12:20)		(12:40)	(10:30)	(14:00)
- pretok (L/s)	6,6		11,1	1,0	1,9
- globina merilnika (cm)	/		/	/	/
6.4.2019 (ura)	18:30	/	18:00	/	16:00
- pretok (L/s)	72		118		19,9
- globina merilnika (cm)	21		46		/
7.4.2019 (ura)	12:00	/	11:30	/	13:00
- pretok (L/s)	44		61		11,7
- globina merilnika (cm)	19		40		/
10.4.2019 (ura)	14:45	/	14:15	/	/
- pretok (L/s)	64		109		
- globina merilnika (cm)	20,5		44		
11.4.2019 (ura)	14:00	13:50	13:15	/	12:45
- pretok (L/s)	686	8	1023		182
- globina merilnika (cm)	30	/	61		/

/ – mesto brez merilnika vodostaja ali podatkov

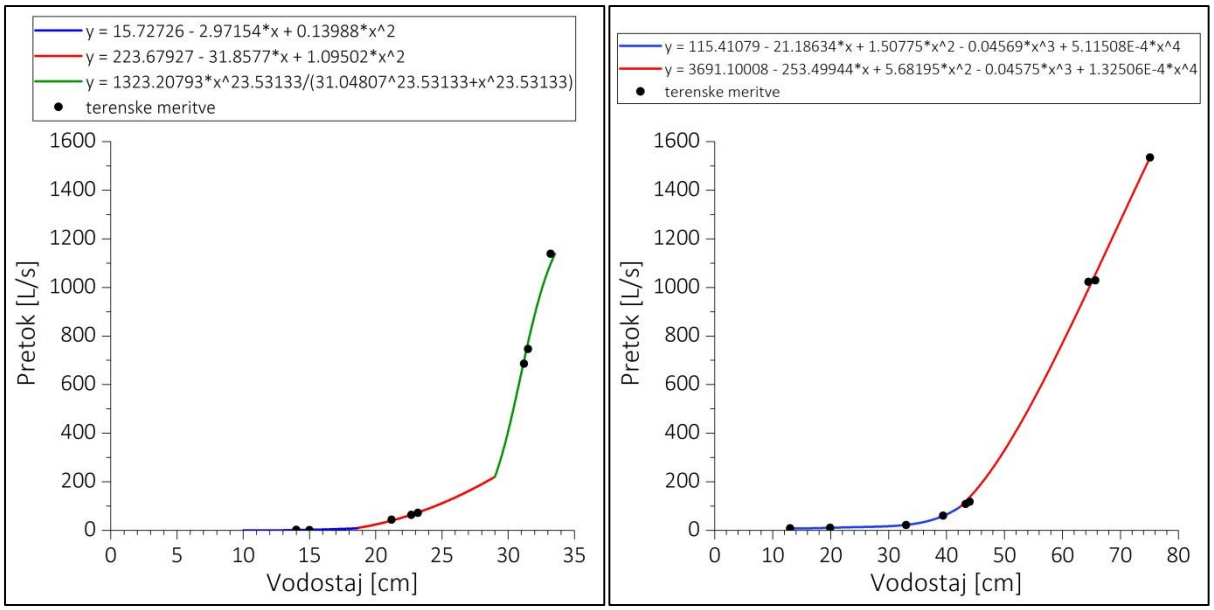


Slika 19: Odstopanja pri surovih meritvah vodostajev na Rečici pri spodnjem in zgornjem mostu in posledičen izračun drsečih sredin za slednje merilno mesto.

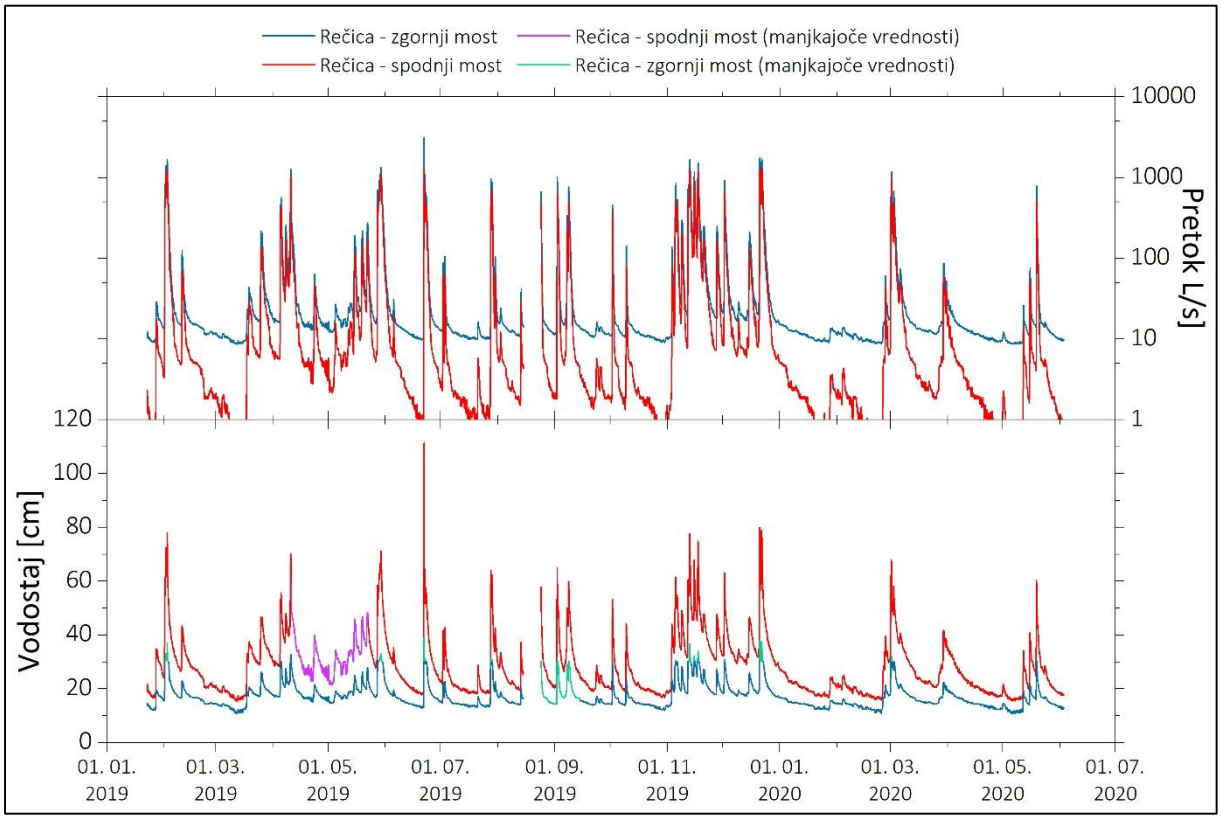
Preglednica 5: Skupek enačb, ki predstavljajo različne segmente pretočnih krivulj za merilni mesti Rečica – zgornji most in Rečica – spodnji most.

x = vodostaj (cm)	**y = pretok (L/s)**
Rečica – zgornji most	
x < 18,6	$y = 15{,}72726 - 2{,}97154*x + 0{,}13988*x^2$
18,6 < x < 29,0	$y = 223{,}67927 - 31{,}8577*x + 1{,}09502*x^2$
x > 29,0	$y = 1323{,}20793*x^{23{,}53133} / (31{,}04807^{23{,}53133} + x^{23{,}53133})$
Rečica – spodnji most	
x < 42,3	$y = 115{,}41079 - 21{,}18634*x + 1{,}50775*x^2 - 0{,}04569*x^3 + 0{,}000511508*x^4$
x > 42,3	$y = 3691{,}10008 - 253{,}49944*x + 5{,}68195*x^2 - 0{,}04575*x^3 + 0{,}000132506*x^4$

Na podlagi teh vrednosti smo izračunali pretočno krivuljo, pri kateri smo vrednosti povezali z istočasnimi terenskimi meritvami pretokov. Pri tem se je za zadovoljivo izkazala kombinacija večjega števila kvadratnih funkcij ali funkcij višjega reda. Posamična funkcija je uporabna za določen razpon korigiranih vodostajev, kot je navedeno v preglednici 5 in prikazano na sliki 20.



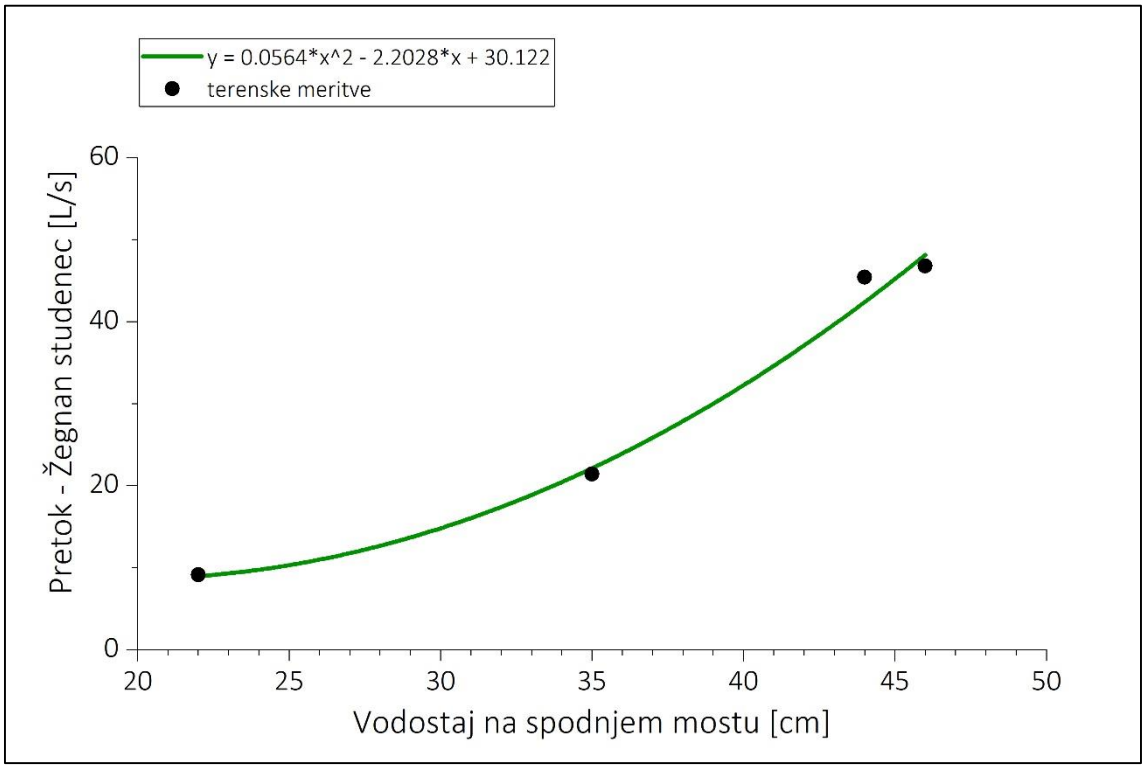
Slika 20: Sestavljeni pretočni krivulji za merilni mesti Rečica – zgornji most (levo) in Rečica – spodnji most (desno).



Slika 21: Izračunan niz meritev vodostajev in pretokov na obeh merilnih mestih Rečice.

Za izračun zveznih vrednosti pretoka smo uporabili pridobljene zvezne vrednosti vodostajev in obe pretočni krivulji. Ker je na obeh merilnih mestih pretočna krivulja vsebovala večje število enačb, smo vodostaje razvrstili po vrsti in posamično enačbo uporabili za točno določen razpon višin (Preglednica 5). S pomočjo teh izračunov smo za obdobja, kjer so na enem od merilnih mest meritve manjkale, zanje manjkajoče vrednosti izračunali na podlagi meritev iz drugega merilnega mesta (Slika 21). Pretok Rečica – zgornji most je predstavljal izdatnost vodotoka, ki priteče iz Župnekovega žrela, Rečica – spodnji most pa skupen pretok vode iz Župnekovega žrela in Žegnanega studenca. Naš namen je bil, da iz razlike pretokov na obeh merjenih mestih izračunamo izdatnost izvira Žegnan studenec, vendar pa so nadaljnje analize in rezultati sledilnega poskusa pokazali, da so na ta način ocenjeni pretoki Žegnanega studenca zaradi omenjenih težav pri meritvah in možnega vpliva drugih površinskih dotokov, ki se pojavljajo v času izdatnejših padavin, precenjeni.

Pri podajanju gotovih vrednosti izračunanih pretokov smo se zato omejili samo na obdobje nizkih vod, v katerem smo izvedli štiri meritve pretokov na obeh merilnih mestih. Če privzamemo, da razlika v izmerjenih pretokih predstavlja pretok Žegnanega studenca in te vrednosti primerjamo z izmerjenimi nivoji Rečica – spodnji most, dobimo pretočno krivuljo Žegnanega studenca ob nizkih vodostajih (Slika 22).



Slika 22: Pretočna krivulja za Žegnan studenec ob nizkih vodostajih.

4.2. IZRAČUN KOLIČINE POVRNJENEGA SLEDILA

Pri obeh sledilnih poskusih smo za vsak posamezni izvir izračunali količino povrnjenega sledila. Izračun je temeljil na vrednostih koncentracije sledila in pretoka izvira v določenem času. Ob seštevku vrednosti za celotno obdobje, smo izračunali skupno količino povrnjenega sledila in njegov delež glede na injicirano količino (Enačba 3).

Enačba 3: Postopek za izračun količine povrnjenega sledila.

$$M = \sum (Q * C * t_{int})$$

M = masa povrnjenega sledila (g)

Q = pretok vode (L/s)

C = koncentracija sledila v vzorcu (µg/L)

t_{int} = časovni interval med posamičnimi meritvami koncentracije (s)

4.3. IZDELAVA HIDROGEOLOŠKE KARTE

Hidrogeološka karta je bila s pomočjo programa ArcMap 10.5.1 izdelana na podlagi geološkega kartiranja, topografskih kart in podatkov katastra jam (ARSO, 2019; GURS, 2019; 2020; Kataster jam, 2019). Litološke enote smo na osnovi njihovih hidrogeoloških lastnostih skladno s priporočili klasifikacije Mednarodne zveze hidrogeologov razdelili v tri osnovne razrede: slabo prepustne plasti, razpoklinski vodonosnik, kraški vodonosnik.

Karti smo dodali objekte in pojave površinskih vod ter rezultate sledilnih poskusov z ocenjenimi generalnimi smermi in hitrostmi toka podzemne vode. Karta je izrisana za okvirno območje prispevnega zaledja izvirov Rečice. Pri tem smo se opirali še na informacije zvezno opazovanih fizikalno-kemijskih lastnosti izvirske vode in na okvirne izračune velikosti prispevnega območja, ki smo jih pridobili z izračunom vodne bilance.

Izračuni okvirne velikosti prispevnega zaledja izvirov Rečice so temeljili na izračunanih pretočnih vrednostih, podatkih o količini padavin (meteorološka postaja Radegunda) ter podatkih o evapotranspiraciji (meteorološka postaja Trojane – Limovce) za opazovano obdobje (ARSO, 2020c). Ob predpostavki, da je skupna količina pretečene vode na izviru tista, ki na nekem območju pade prek padavin in ne izhlapi ali se porabi v rastlinah in tleh, potem velikost zaledja predstavlja razmerje med skupno količino pretečene vode na izviru in višino padavin z odšteto evapotranspiracijo (Enačba 4).

Enačba 4: Postopek za izračun velikosti prispevnega območja.

$$A = \frac{Q_{mean} * t_{int}}{P - E}$$

A = površina prispevnega območja (m^2)

Q_{mean} = povprečen pretok vode v obdobju t_{int} (m^3/s)

t_{int} = obdobje primerjave meteoroloških in hidroloških podatkov (s)

P = Količina padavin v obdobju t_{int} (m)

E = Vrednost evapotranspiracije v obdobju t_{int} (m)

5. REZULTATI

5.1. GEOLOŠKO KARTIRANJE

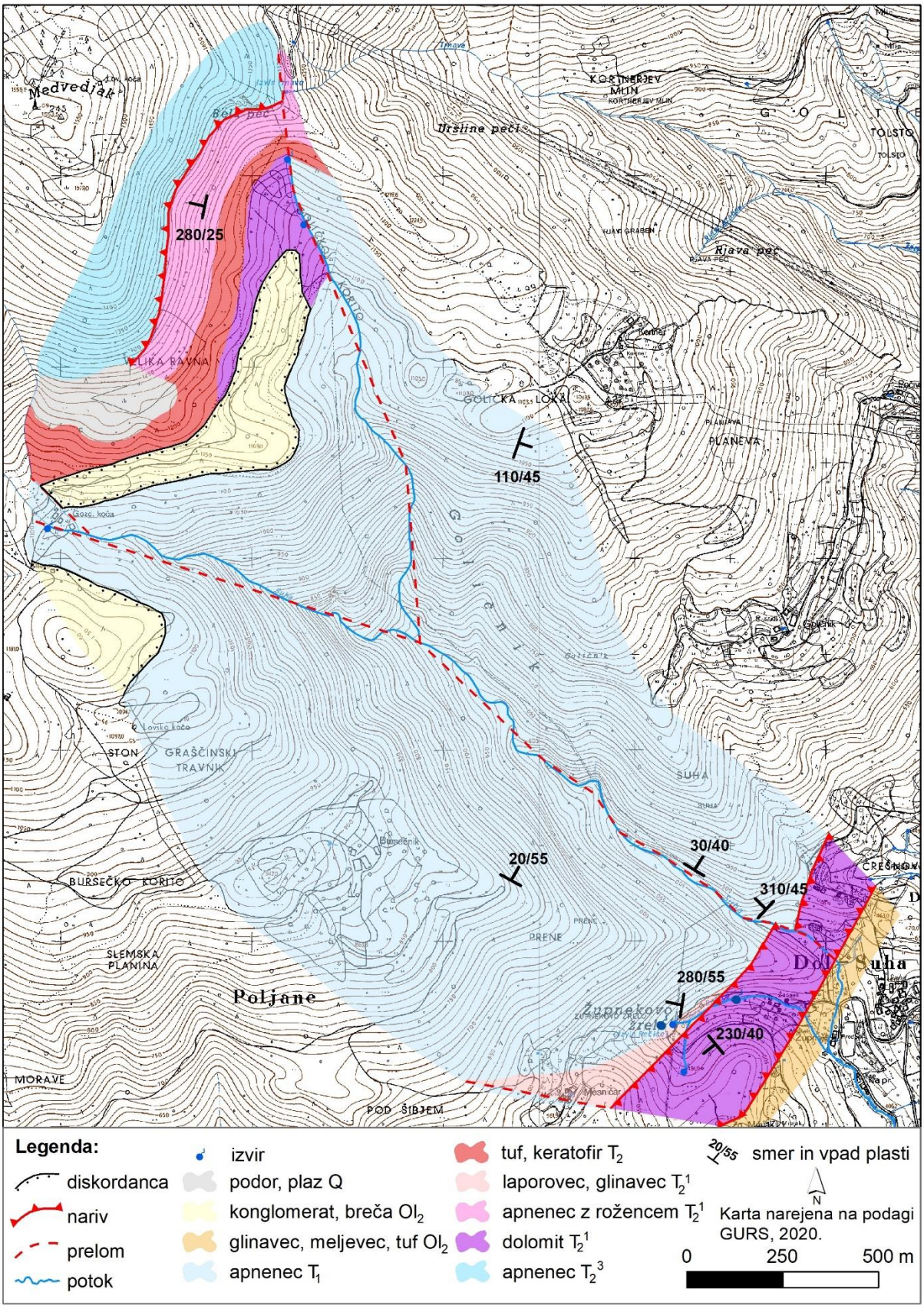
Z natančnim geološkim kartiranjem smo izdelali karto, ki prikazuje litološke in tektonske razmere obravnavanega območja. Večji del zavzemajo močno tektonizirani apnenci spodnje triasne starosti (T_1), v katere je, znotraj močnejše prelomne cone generalne smeri severozahod–jugovzhod, svojo sotesko vrezal potok Suha. Zaradi velike pretrtosti obravnavanega območja se voda hitro infiltrira v podzemlje in omogoča zakrasevanje kamnin vzdolž lezik in razpok (Slika 23). Ti prevladujoči apnenci so v zaledju izvirov Župnekovega žrela in Žegnanega studenca posledično zelo močno zakraseli in dobro prepustni.

Padavinska voda tako nemudoma ponikne v podzemlje in se pretaka po razširjenih razpokah in kanalih. Večjih in daljših jam na proučevanem območju ni, vendar pa je vzdolž soteske Suhe opazna močna kanalska prevotljenost (zakraselost) med posameznimi plastmi kamnine, ob razpokah in prelomih (Slika 23). Župnekovo žrelo in Žegnan studenec izvirata ob močnejšem narivnem prelomu, ki skupaj z nižje ležečimi neprepustnimi kamninami onemogočajo vodi, da bi se podzemno pretakala proti dolini.

Suha ima povirje v severozahodnem delu prispevnega zaledja, ki ga poleg apnencev prekrivajo tudi za vodo slabo prepustne in neprepustne dolomitne, tufne, keratofirne in konglomeratne plasti. Mestoma, se ob vznožjih strmejših pobočij pojavljajo vodo prepustnejši podori in plazovi. Ob njenem spodnjem toku, tik ob ustju soteske, so opazne obprelomne drse (Slika 24), Drse odražajo tektonsko aktivnost območja, na kar nakazuje tudi raznolikost vpadov plasti, ki kažejo na rotacijo posameznih apnenčevih blokov ob tektonskih premikih. Zaradi teh tektonskih vplivov sta razpokanost masivnih apnencev predvsem v soteski Suhe in intenzivno ter kompleksno zakrasevanje celotnega območja.

Slika 23: Močna pretrtost in zakraselost med plastmi kamnine vzdolž soteske Suhe.

Slika 24: Obprelomne drse na apnenčevem bloku ob vznožju soteske Suhe.



Slika 25: Geološka karta prispevnega zaledja Župnekovega žrela in Žegnanega studenca.

Na nadmorski višini 1100 m se začnejo pojavljati konglomerati in breče zgornje oligocenske starosti, z rumenkastim in rdečkastim vezivom (Ol_2). Leča opisanih kamnin se je v normalnem stratigrafskem zaporedju (t.j. konkordantno) odložila na ostale kamnine a se je ohranila le ponekod. Mestoma prehaja v srednje triasne dolomite (T_2^1), drugje pa leži na stiku z andezitnimi tufi in keratofirji, ki jih zaznamuje rjavo-rumena do zelenkasta barva z vmesnimi vključki plagioklazov in limonitnih zapolnitev manjših votlin (T_2). Nad omenjenimi plastmi se pojavlja pas srednje triasnih svetlo sivih apnencev z gomolji rožencev (T_2^1). Na njih so narinjeni srednje triasni do zgornje triasni masivni apnenci ($T_{2,3}$), ki predstavljajo tektonski pokrov in vrh Medvedjaka. Na prelomnem kontaktu, ki se nadaljuje iz soteske Suhe na severu obravnavanega območja, se na stiku med masivnimi apnenci in srednje triasnimi dolomiti pojavi manjši izvir. Tudi drugod po celotnem severnem delu obravnavanega območja se po obilnem deževju pojavljajo manjši potočki, ki ponikajo v zakrasele apnence. Zaradi strmega pobočja Medvedjaka na Golški planini se mestoma pojavljajo manjši skalni podori in plazovi (Q).

V spodnjem delu, na območju vasi Dol-Suha se pojavljajo zgornje oligocenski glinavci do meljevci z vmesnimi vložki andezitnih tufov, zelenkasto do oker-rumenkaste barve (Ol_2). Kamnina je zaradi hitrega preperevanja včasih slabše vidna le v izdankih in usadih ob gozdni poti. Nad vasjo se po strugi Suhe navzgor nad narivnim kontaktom smeri severovzhod–jugozahod v zatravljenih površinah v ocenjeni povprečni debelini 35 m pojavljajo v t.i. tektonski krpi pretrti in prepereli dolomiti srednje triasne starosti (T_2^1).Na jugozahodnem delu obravnavanega območja s prelomnim kontaktom prehajajo v menjavanje laporovcev in glinavcev srednje triasne starosti (T_2^1), drugje pa s prelomnim kontaktom smeri severovzhod–jugozahod prehajajo v tektonsko močno pretrte masivne in mestoma plastnate apnence in laporaste apnence spodnje triasne starosti (T_1). Laporovci in glinavci normalno prehajajo v omenjene apnence, na njihovem kontaktu pa je izvir Župnekovo žrelo. Voda Žegnanega studenca izvira v dolomitnih plasteh v neposredni bližini prelomne cone (Slika 25).

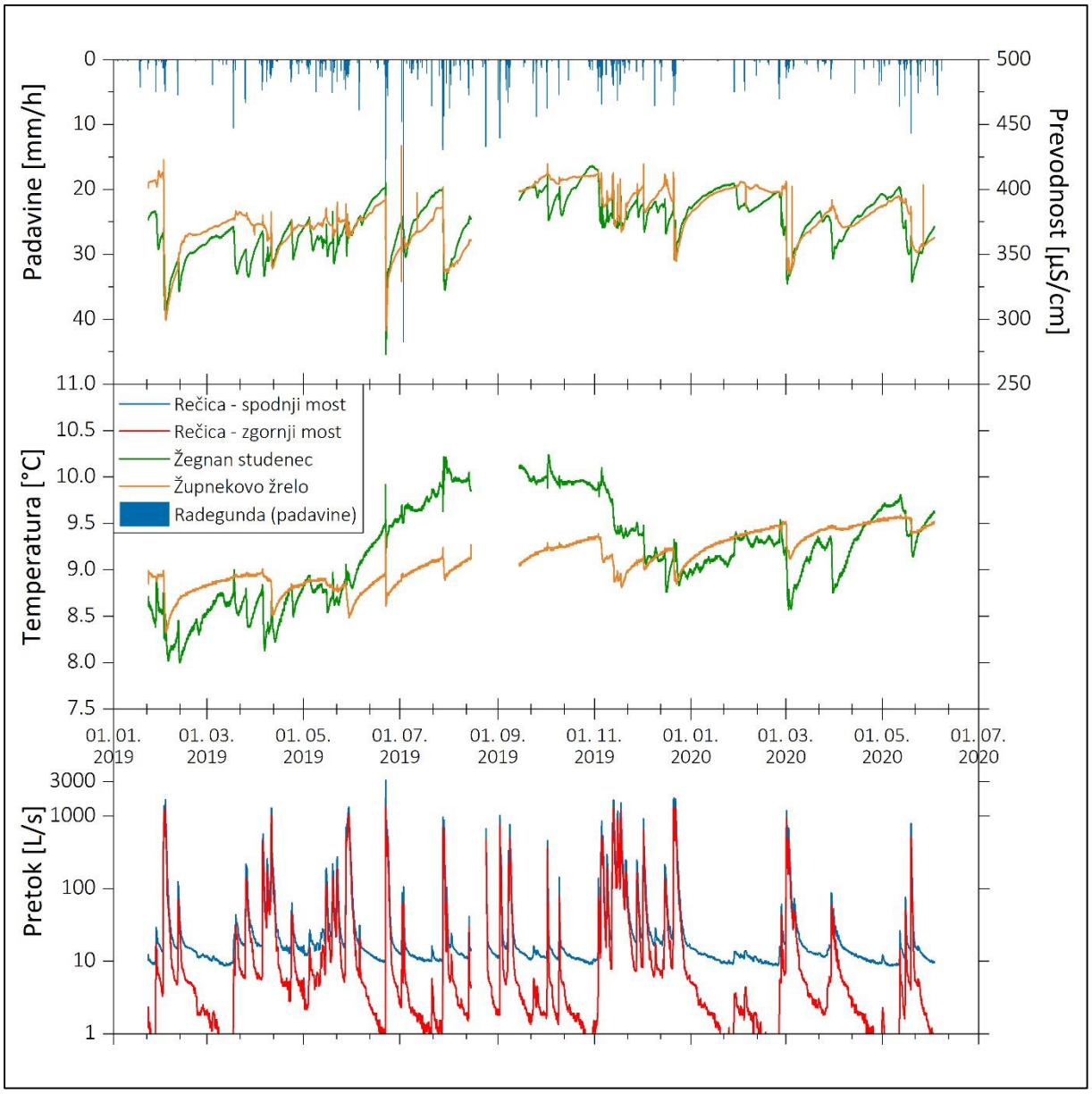
5.2. ZVEZNE IN OBČASNE MERITVE NA IZVIRIH

Samodejne meritve pritiska, temperature in specifične električne prevodnosti so trajale skoraj leto in pol (23. januar 2019 – 3. junij 2020), pri čemer je v poletnem obdobju prišlo do različno dolgega izpada podatkov (od 31 do 52 dni). V obdobju merjenja je na bližnji meteorološki postaji Radegunda padlo 1590 mm padavin (ARSO, 2020c).

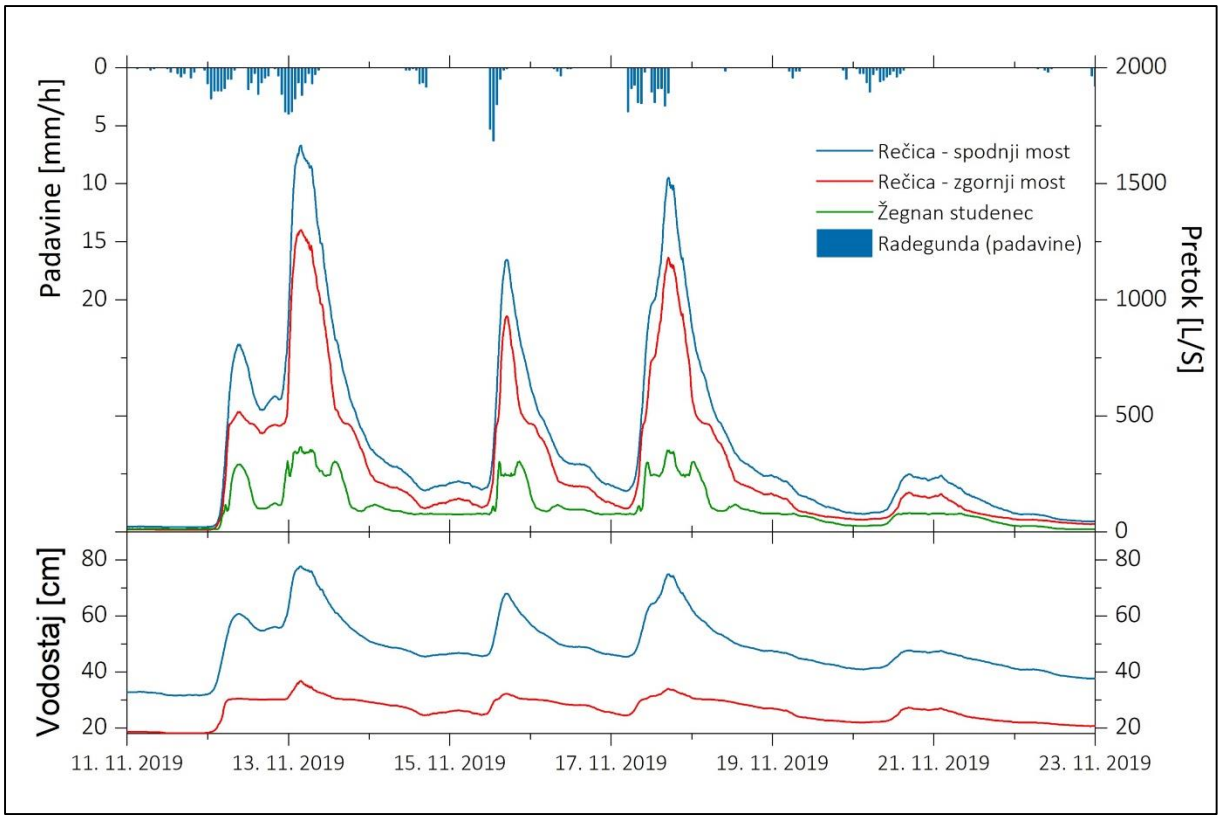
5.2.1. Pretočne razmere

Izvira imata izrazit kraški značaj, s kratkotrajno zelo visokimi pretoki, ki nastopijo zelo kmalu po obilnejših padavinah, a tudi zelo hitro upadejo. V času nizkih vodostajev skupni pretok znaša le nekaj L/s, medtem ko ob visoki vodi doseže več m^3/s. Odzivata se na vsak padavinski

dogodek, pri čemer je bilo v času merjenja okoli 15 takšnih, ko je pretok pri spodnjem mostu presegel 500 L/s (Slika 26).



Slika 26: Dinamika pretokov, temperature in specifične električne prevodnosti vode na merilnih mestih Rečice.



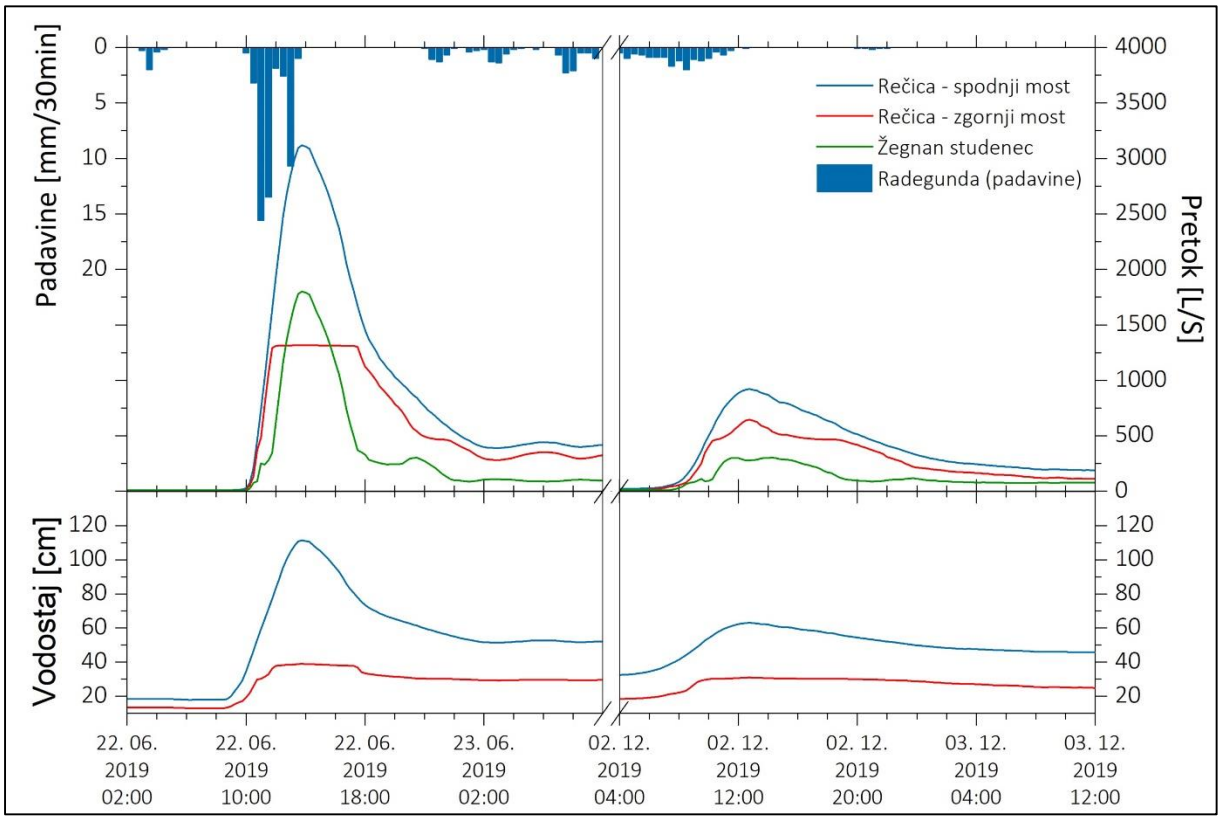
Slika 27: Niz večjega števila padavinskih dogodkov, ki je povzročil niz povišanih pretokov Rečice.

Merilno mesto Rečica – zgornji most prestavlja izdatnost izvira Župnekovo žrelo, ki ob nizkih vodostajih lahko presahne, okoli 3/4 celotnega opazovanega časa pa je pretok znašal manj kot 10 L/s. Pri tem vrednosti odvzema iz izvira niso bili znane in pri izračunih niso bile upoštevane. Ob visokih vodah pretok Župnekovega žrela lahko naraste preko 1000 L/s. Najvišja izmerjena vrednost za proučevano obdobje je bila 1139 L/s. Zaradi omenjenih težav pri meritvah pretokov za to merilno mesto za izjemno visoke vrednosti vodostajev ustrezne pretočne krivulje ni bilo mogoče določiti. Zato maksimalnih vrednosti pretokov tudi ni bilo možno oceniti. Srednji pretok ocenjujemo na 38,5 L/s, a to vrednost izvir doseže le v 14 % opazovanega časa.

Na merilnem mestu Rečica – spodnji most je bil minimalni izračunani pretok 8,6 L/s, medtem ko je bil v merjenem obdobju najvišji izmerjeni pretok 1535 L/s. Samo v času dveh dogodkov je bil za kratko obdobje nekaj ur vodostaj izrazito nad vodostajem v času meritve pretoka ob visokih vodah. Po uporabljeni pretočni krivulji srednji pretok ocenjujemo na okrog 61 L/s. To vrednost je Rečica presegla v 13 % opazovanega časa. Maksimalni pretok ocenjujemo na okrog 3119 L/s, vendar pri tem opozarjamo na možnost napake zaradi težav pri oceni visokih pretokov.

Ob nizkem vodostaju Žegnan studenec predstavlja praktično celotni dotok v Rečico med zgornjim in spodnjim mostom (Curek le nekaj dL/s), zato lahko njegov minimalni pretok ocenimo na okrog 8 L/s. Ob visokem vodostaju zaradi večjih napak pri izračunu pretokov in drugih dotokov pretoka Žegnanega studenca ni možno oceniti.

Pretoki Rečice se ob izrazitih padavinah lahko povišajo za nekaj stokrat (Slike 26, 27 in 28). Slika 28 prikazuje dva različna padavinska dogodka. Pri poletnemu dogodku (junij 2019) je prišlo do kratkotrajnih, a zelo intenzivnih padavin. V zgolj treh urah je padlo 50 mm dežja. Pretoki Rečice so v le 5 urah narasli z 10 na preko 1500 L/s. Zelo hiter je bil tudi upad, saj so vrednosti v 13 urah upadle na 390 L/s, a je temu sledilo novo deževje in ponovno povišanje pretokov.



Slika 28: Različna hitrost odziva pretočnih razmer na opazovanih merilnih mestih v času dveh različno intenzivnih padavinskih dogodkov.

V času zimskega dogodka (december 2019) je bilo deževje dolgotrajnejše in manj intenzivno, saj je 20 mm padavin padlo v 15 urah. Posledično je pretok naraščal počasneje. Za porast s prvotnih 21 L/s do končnih 924 L/s je vodotok potreboval skoraj 10 ur. Upadanje vodostajev je bilo še nekoliko počasnajše, a še vedno relativno hitro (na raven pred dogodkom so se vodostaji vrnili po 5 dneh).

Za Curek in Suho zveznih meritev ni na voljo. Na podlagi nekaj terenskih meritev pa lahko ocenimo izdatnost Curka od nekaj dL/s ob suši do okoli 10–20 L/s v času visokih vod. Ob nizkih vodostajih ima Suha v zgornjem toku pretok nekaj L/s, a vzdolž struge v celoti ponika v podzemlje in sedimente v strugi. Ob visokih vodah pa se razvije v hudournik, ki lahko doseže pretok tudi več sto L/s. V takšnih razmerah se prelije v površinsko strugo in se pod gostiščem Atelšek izliva v Rečico.

5.2.2. Značilnosti temperature in specifične električne prevodnosti izvirske vode

Temperatura in specifična električna prevodnost izvirske vode sta lahko dobra pokazatelja razmer, po katerih potuje voda do kraških izvirov (Petrič in Kogovšek, 2010; Ravbar et al., 2011). Na podlagi občasnih ročnih meritev teh parametrov smo opravili kalibracijo zveznih meritev. Za primerjavo podajamo še rezultate občasnih ročnih meritev na dveh pritokih Curek in Suha (Preglednica 6).

Izvira Rečice kažeta le blaga sezonska nihanja obeh parametrov in nagle spremembe v času močnejših padavinskih dogodkov. Pri Župnekovemu žrelu so se izmerjene vrednosti temperature v opazovanem obdobju gibale med 8,3 in 9,6 °C, kar predstavlja le 1,3 °C razpona (Preglednica 7). Povprečna vrednost je znašala 9,1 °C, pri čemer ni opaznih jasnih razlik v dinamiki v poletnem ali zimskem času. V 12 mesecih je bilo zabeleženih 12 dogodkov z izrazitejšimi spremembami (> 0,1 °C), do teh pa pride šele, ko pretok Rečice pri zgornjemu mostu preseže 500 L/s (oz. 850 L/s pri spodnjemu mostu). To verjetno predstavlja kritično količino, ko stalni izviri ne zmorejo prevajati več vse vode in se zato aktivirajo tudi višje ležeči prelivni izviri iz jame. Za prav vsak tak dogodek je značilno, da temperatura vode upade. Navadno je sprememba zelo hitra (npr. v 7 – 10 urah po intenzivnejših padavinah).

Občasno (poleti) ob padavinskemu dogodku temperatura najprej v 1 – 3 urah rahlo naraste, a potem ravno tako hitro upade pod začetno raven. Sledi nekaj tednov ali mesecev dolgo obdobje, ko temperatura postopoma narašča, dokler ne pride do naslednjega padavinskega dogodka (Sliki 26 in 29). Najverjetnejši razlog za takšno dinamiko je, da sta območje in s tem voda, ki sta bližje izviru toplejša kot tista z višjo nadmorsko višino. Posledično imajo ta območja nižjo temperaturo ozračja, ki vpliva tudi na temperaturo podzemlja in v njej uskladiščene vode. V času padavinskega dogodka, ko je pretakanje podzemne vode proti izviru pospešeno, ta hladna voda iz zaledja hitreje doseže izvir in se nima časa uravnotežiti s temperaturo okoliškega podzemlja. Ko padavine prenehajo, se tudi pretakanje v podzemlju umiri in voda se zopet počasi segreva. Če ni novih padavin, vrednosti temperature počasi dosežejo raven pred dogodkom.

Preglednica 6: Ročne meritve specifične električne prevodnosti (SEP) in temperature vode.

Datum in merjene lastnosti	**Župnekovo žrelo (vodnjak)**	**Curek**	**Rečica – zgornji most**	**Žegnan studenec (vodnjak)**	**Rečica – spodnji most**	**Suha**
23. 01. 2019 (ura)	13:30	13:30	11:00	13:00	11:30	Vodotok
- SEP (µS/cm)	404	481	401	377	388	suh.
- temperatura (°C)	9,6	0,6	6,4	9,4	7,2	
02. 02. 2019 (ura)	/	21:45	21:30	/	21:00	/
- SEP (µS/cm)		302	316		314	
- temperatura (°C)		5,6	9,4		9,3	
03. 02. 2019 (ura)	/	8:20	8:15	/	7:45	9:45
- SEP (µS/cm)		296	307		300	274
- temperatura (°C)		5,8	9,2		9,2	7,2
28. 02. 2019 (ura)	10:10	10:30	/	10:40	/	10:40
- SEP (µS/cm)	350	469		354		295
- temperatura (°C)	9,7	2,7		9,3		9,5
21. 03. 2019 (ura)	11:45	11:30	12:30	11:00	12:00	14:40
- SEP (µS/cm)	363	463	362	338	352	295
- temperatura (°C)	9,2	3,7	9,5	9,5	8,9	6,0
06. 04. 2019 (ura)	/	/	18:30	/	18:00	16:00
- SEP (µS/cm)			369		356	304
- temperatura (°C)			9,7		9,4	7,9
07. 04. 2019 (ura)	/	/	12:00	/	11:30	/
- SEP (µS/cm)			365		355	
- temperatura (°C)			9,9		9,6	
10. 04. 2019 (ura)	/	/	14:45	/	14:15	/
- SEP (µS/cm)			361		356	
- temperatura (°C)			9,7		9,6	
11. 04. 2019 (ura)	14:30	13:45	14:00	13:15	13:15	12:45
- SEP (µS/cm)	343	350	343	342	344	288
- temperatura (°C)	9,4	8,1	9,4	9,4	9,4	7,8
15. 08. 2019 (ura)	9:30		9:50	10:10	10:25	10:50
- SEP (µS/cm)	361		359	377	366	341
- temperatura (°C)	9,7		10,3	10,5	10,8	13,4
25. 02. 2020 (ura)	16:15	16:00	15:45	15:15	15:30	/
- SEP (µS/cm)	398	489	396	398	400	
- temperatura (°C)	9,8	6,0	8,0	9,7	8,8	
10. 05. 2020 (ura)	13:30	13:15	13:00	10:15	12:15	/
- SEP (µS/cm)	394	488	400	399	401	
- temperatura (°C)	9,9	11,9	12,1	10,1	10,9	
03. 06. 2020 (ura)	13:55	13:40	13:30	12:35	13:20	15:30
- SEP (µS/cm)	363	482	369	371	375	338
- temperatura (°C)	9,9	13,3	13,8	10,0	11,3	10,8

/ – ni podatka

Preglednica 7: Značilnosti temperature in specifične električne prevodnosti vode na izvirih Rečice v opazovanem obdobju.

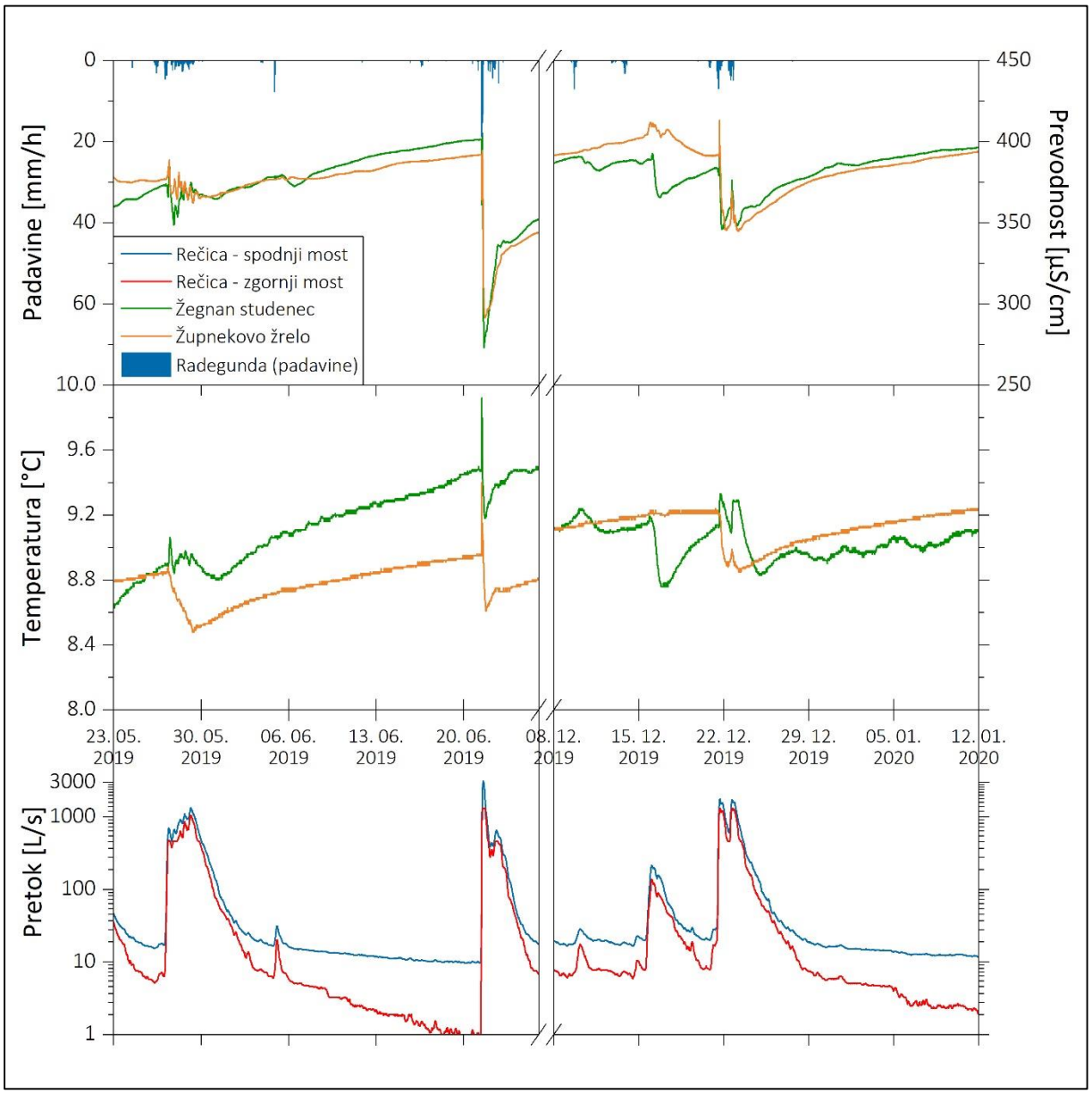
	Župnekovo žrelo	**Žegnan studenec**
Minimalna temperatura (°C)	8,3	8,0
Maksimalna temperatura (°C)	9,6	10,2
Povprečna temperatura (°C)	9,1	9,2
Minimalna specifična električna prevodnost (µS/cm)	291	273
Maksimalna specifična električna prevodnost (µS/cm)	433	418
Povprečna specifična električna prevodnost (µS/cm)	379	375

Pri Žegnanem studencu so se temperature preko leta gibale med 8,0 in 10,2 °C (2,2 °C razpona) (Preglednica 7), pri čemer so jasno sledile letnim časom. V primerjavi z Župnekovim žrelom je bilo v merjenem obdobju zabeleženih bistveno več dogodkov, ko se je temperatura občutneje spremenila (> 0,1 °C). To nakazuje na hitrejši pretok voda s površja proti izviru. Do nihanja temperature je prišlo ob praktično vsakem dogodku, ko je pretok Rečice pri spodnjem mostu presegel 25 L/s (Sliki 26 in 29). Sprememba je bolj zvezna in odvisno od intenzivnosti padavin traja od 1 – 10 ur, kar nakazuje, da je tok vode skozi podzemlje tako hiter, da se na svoji poti do izvira ne uravnoteži povsem na temperaturo podzemlja.

Temperaturni je podobna dinamika vrednosti specifične električne prevodnosti izvirske vode. Te se v primeru Župnekovega žrela gibljejo med 291 in 433 µS/cm, v primeru Žegnanega studenca pa med 273 in 418 µS/cm. Za obe merilni mesti je ob padavinskemu dogodku značilna dokaj (a ne povsem) podobna dinamika specifične električne prevodnosti vode. Ob povišanju pretoka vrednosti pogosto najprej nekoliko narastejo (razlog je iztekanje nekoliko bolj nasičene vode, ki je uskladiščena v podzemlju; t.i. stare vode), nato pa sledi nagel padec zaradi dotoka večje količine sveže in manj nasičene padavinske vode (t.i. novo infiltrirane vode). Po tem, ko je višek padavinskega dogodka mimo, se vrednosti specifične električne prevodnosti izvirske vode počasi vračajo na raven pred dogodkom, saj se vode v podzemlju vse bolj učinkovito zasitijo s kalcijevim karbonatom, ki te vrednosti višajo.

Nihanja vrednosti specifične električne prevodnosti so pri Žegnanem studencu nekoliko bolj izrazita. Do sprememb pride praktično ob vsakem padavinskem dogodku. Pri Župnekovem žrelu pa ob padavinah, ki so sledile daljšim sušnim obdobjem, vrednosti specifične električne prevodnosti izvirske vode preden občutno upadejo dlje časa ostajajo visoke. Ob večjih padavinskih dogodkih pride do izrazitejših sprememb, so pa spremembe opazne tudi ob manjših dogodkih, ko se temperatura vode ne spremeni. To nakazuje na to, da do določene mere izteka samo t.i. stara voda, nova pa doseže izvir šele ob povečanih oziroma dodatnih padavinah (Sliki 26 in 29). Nenavadnega obnašanja ali občutnega povišanja specifične električne prevodnosti, ki bi nakazovale na onesnaženje vode, na nobenem od izvirov nismo zaznali.

Opažene lastnosti vode na izvirih Rečice nakazujejo, da se izvira obnašata precej drugače in imata vsaj delno tudi ločeno prispevno zaledje. Domnevamo, da ima Župnekovo žrelo večje zaledje, ki sega na območja z višjimi nadmorskimi višinami. Predvsem pa so podzemne vodne poti, ki vodijo k izviru, nekoliko drugačne velikosti in so med seboj drugače povezane oziroma zakrasele. Deloma Župnekovo žrelo deluje kot preliv voda v sistemu.

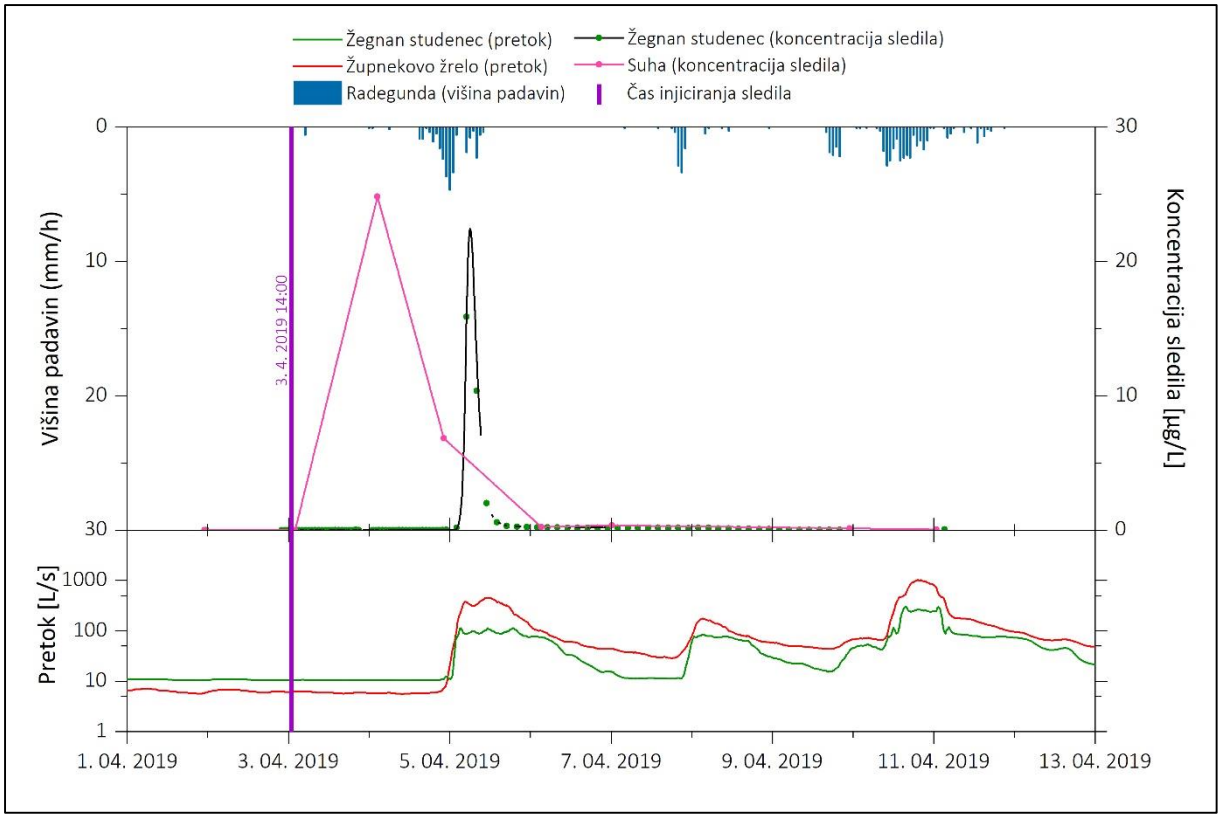


Slika 29: Dinamika temperature, specifične električne prevodnosti vode in pretočnih vrednosti na opazovanih izvirih v poletnem (levo) in zimskem (desno) času.

5.3. SLEDILNA POSKUSA

V času prvega sledilnega poskusa (3. april 2019), ko smo sledilo injicirali v požiralnike Suhe, je bilo obdobje nizkih vodostajev. Rečica je imela 16,5 L/s, Suha pa 1,9 L/s pretoka. Nato je 5. aprila 2019 padlo 1,6 mm, 6. aprila pa 15,3 mm padavin in pretoki so se nekoliko povečali.

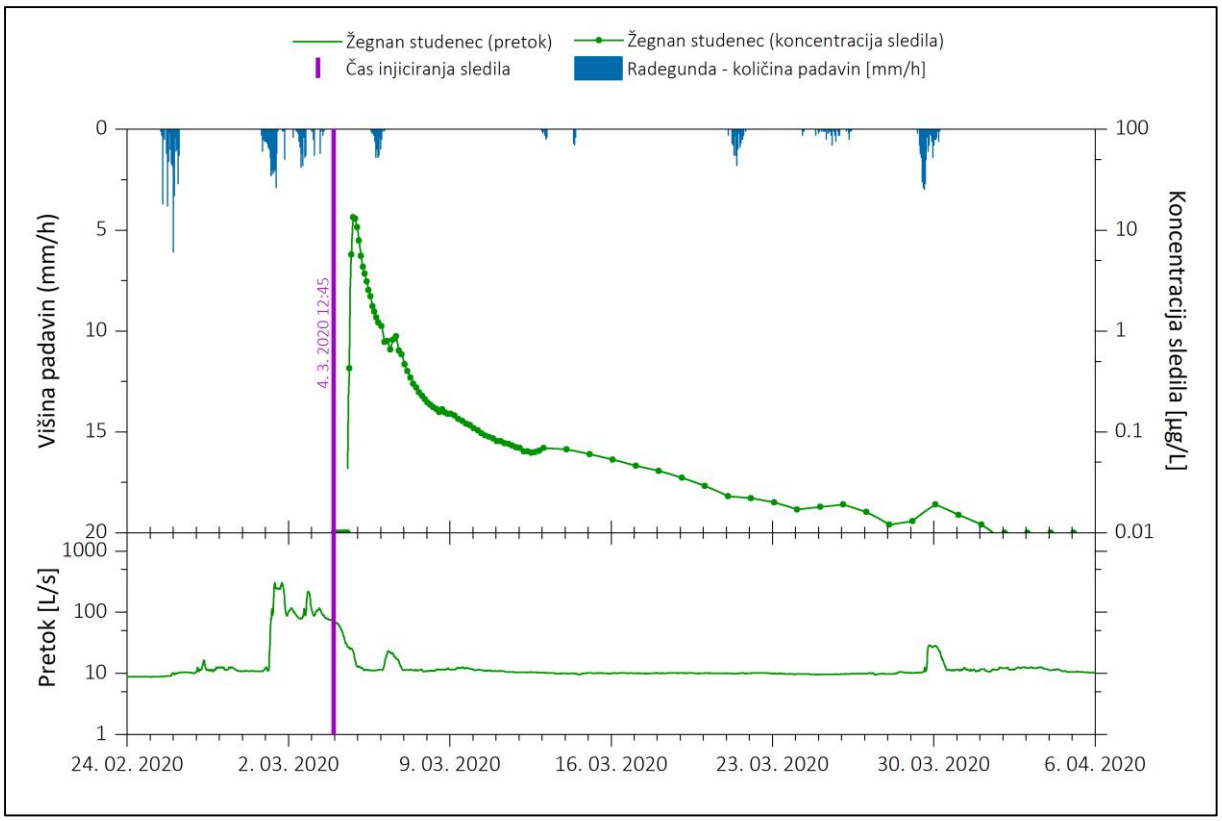
Sledilo smo zaznali le v 86 m nižje ležečem Žegnanem studencu. Najprej je bilo povišanje koncentracij zaznano po 48 urah, medtem ko so višek 22,4 µg/L dosegle štiri ure kasneje. Sledilo je na izviru iztekalo 3 dni. Z upoštevanjem zračne razdalje 615 m med točko injiciranja in Žegnanim studencem ter časom od injiciranja do prvega pojava sledila smo izračunali maksimalno navidezno hitrost toka 13 m/h, z upoštevanjem časa do pojava najvišje koncentracije sledila pa dominantno navidezno hitrost toka 12 m/h. Če pri izračunu upoštevamo čas od začetka padavin, ki so potisnile sledilo skozi sistem, je maksimalna navidezna hitrost toka 62 m/h, dominantna navidezna hitrost toka pa 44 m/h. Oblika krivulje iztekanja sledila z enim izrazitim viškom nakazuje, da se voda med ponori Suhe in izvirom Žegnanega studenca relativno hitro pretaka po sistemu povezanih in dobro prepustnih kraških razpok in kanalov (Slika 30).



Slika 30: Časovni potek vrednosti padavin na ARSO postaji Radegunda, pretokov, koncentracije uranina in ocenjenega deleža povrnjenega sledila v času prvega sledilnega poskusa aprila 2019.

Ker v opazovanem obdobju sledila na Župnekovem žrelu nismo zaznali, povezave med ponori Suhe in tem izvirom ob hidroloških razmerah nizkih vodostajev ne moremo potrditi. Občasno spremljanje vzorcev Suhe ob iztoku iz soteske pa nakazuje, da je po strugi Suhe med sedimenti odtekla približno desetina injiciranega sledila. Za oceno deleža povrnjenega sledila v Žegnanem studencu smo uporabili pretoke, ki smo jih izračunali z upoštevanjem pretočne krivulje ob nizkih vodostajih (Slika 22) in izmerjene koncentracije sledila. Po tej oceni je skozi izvir Žegnani studenec odteklo približno 88% sledila.

Pri drugem sledilnem poskusu smo injiciranje opravili v času višjih vodostajev. Med 1. in 3. marcem 2020 je padlo 37,9 mm padavin, 6. marca 2020 pa v 11 urah še dodatnih 8,4 mm. Po padavinah v začetnih dneh meseca so pretoki pod spodnjim mostom narasli na okoli 1200 L/s., a so tudi hitro upadali, tako da so bili v času pojava sledila že nižji kot pri prvem sledilnem poskusu. Očitno pa so predhodna dobra namočenost nezasičene cone in padavine takoj po injiciranju (4. marec 2020) omogočile hiter prenos sledila proti izvirom.



Slika 31: Časovni potek vrednosti padavin na ARSO postaji Radegunda, pretokov, koncentracije uranina in ocenjenega deleža povrnjenega sledila v času drugega sledilnega poskusa med marcem in aprilom 2020.

Sledilo, ki smo ga injicirali v razpoko ob cesti proti kmetiji Bursečnik, smo le 14 ur po injiciranju zaznali v izviru Žegnan studenec. Maksimalne koncentracije 15,2 µg/L je doseglo 5,5 ure zatem

in iz izvira iztekalo 5 dni. Tudi v tem primeru je bilo iztekanje sledila hitro in skozi sistem dobro povezanih podzemnih kanalov (Slika 31). Ob upoštevanju zračne razdalje 685 m smo izračunali navidezno maksimalno hitrost potovanja vode 49 m/h (do časa prvega pojava sledila), navidezno dominantno hitrost potovanja vode pa 35 m/h (do časa maksimalne koncentracije sledila). Pri oceni deleža povrnjenega sledila smo upoštevali pretoke Žegnanega studenca, izračunane po pretočni krivulji za nizke vode in izmerjene koncentracije sledila. Po tej oceni je bil delež povrnjenega sledila v času od 5. do 13. marca 2020 približno 42%.

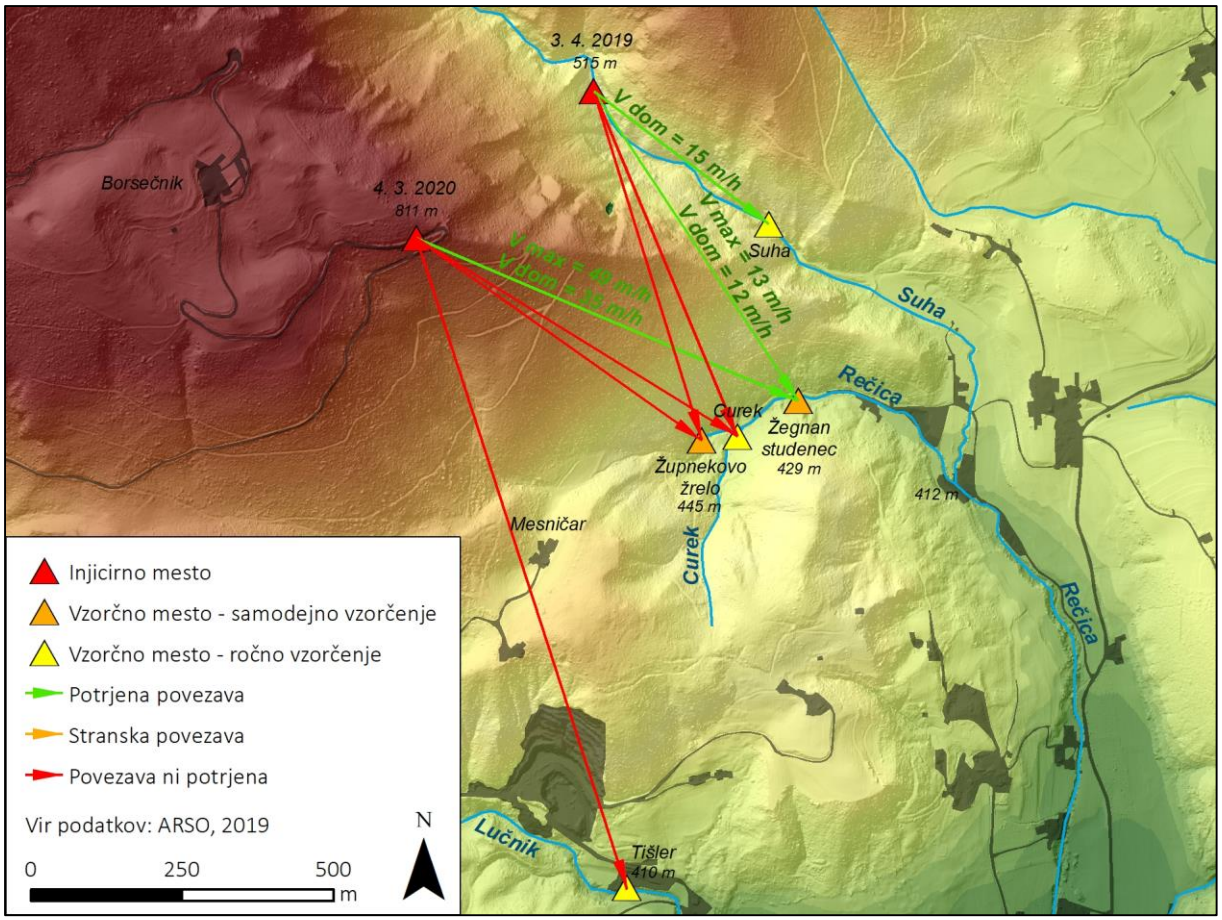
Koncentracije v Žegnanem studencu so ponovno rahlo narasle po nekoliko bolj intenzivnem padavinskem dogodku 20. maja 2020. Dan pred tem je v 12 urah padlo 28,7 mm padavin. Vendar je najvišja izmerjena vrednost 0,08 µg/L premajhna, da bi lahko zanesljivo potrdili pojav sledila in je lahko le posledica izpiranja prej uskladiščene, nekoliko bolj onesnažene vode. Ker v opazovanem obdobju sledila na Župnekovem žrelu nismo zaznali, povezave med območjem kmetije Bursečnik in tem izvirom ne moremo potrditi.

Preglednica 8: Povzetek rezultatov sledenja: t_1 – čas od injiciranja do prve zaznave sledila, v_{max} – maksimalna navidezna hitrost pretakanja, c_{max} – najvišja izmerjena koncentracija sledila, t_{dom} – čas od injiciranja do zabeležene najvišje koncentracije sledila, v_{dom} – dominantna navidezna hitrost pretakanja, R – ocenjeni delež povrnjenega sledila.

	t_1 (h)	**v_{max} (m/h)**	**c_{max} (µg/L)**	**t_{dom} (h)**	**v_{dom} (m/h)**	**R (%)**
1. sledilni poskus: injiciranje 20 g uranina v ponor v strugi Suhe						
Žegnan studenec	48	13	22,4	52	12	60-70
Suha – vzorčno mesto	*		24,8	24,5	15	~30
2. sledilni poskus: injiciranje 50 g uranina v razpoko ob cesti pod kmetijo Bursečnik						
Žegnan studenec	14	49	15,2	19,5	35	~30

* Zaradi občasnega vzorčenja smo ob prvem pojavu sledila hkrati izmerili c_{max}

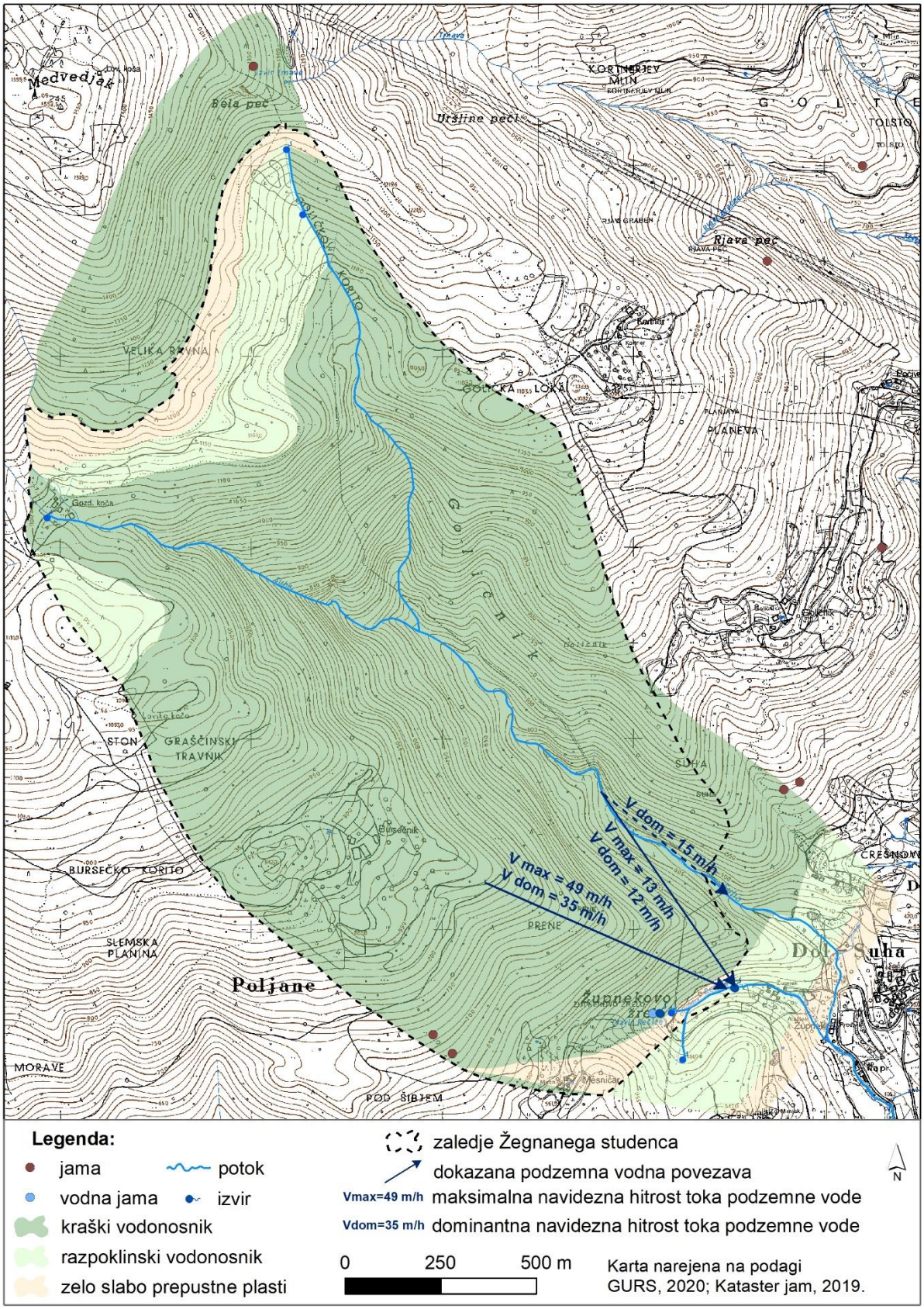
Rezultati obeh sledilnih poskusov so povzeti na sliki 32 in v preglednici 8.



Slika 32: Prikaz potrjenih in nepotrjenih vodnih zvez in izračunane potovalne hitrosti ob maksimalni koncentraciji sledila.

5.5. HIDROGEOLOŠKA KARTA

Na podlagi geološkega kartiranja in javno dostopnih virov hidroloških, jamskih in drugih topografskih podatkov (npr. objekti in pojavi površinskih vod, podzemnih jam) smo izdelali hidrogeološko karto (Slika 33). Na osnovi hidrogeoloških lastnostih posameznih litoloških enot smo pripravili tri osnovne hidrogeološke razrede: slabo prepustne plasti, razpoklinski vodonosnik, kraški vodonosnik.



Slika 33: Hidrogeološka karta obravnavanega območja.

Med slabo prepustne plasti smo zaradi slabe prepustnosti kamnin uvrstili tufe in keratofirje, zgornje oligocenske glinavce in meljevce ter laporovce in glinavce srednje triasne starosti. Med slabše izdaten razpoklinski vodonosnik smo uvrstili konglomerate in breče zgornje oligocenske starosti ter srednje triasni dolomit, kjer občasno prihaja do površinskega odtoka. Območja dobro prepustnih kamnin s kraško poroznostjo smo razvrstili v kraški vodonosnik. Sem spadajo območja triasnih apnencev in apnencev z roženci. V to kategorijo smo uvrstili tudi plasti skalnega podora in plazu.

Karti smo dodali rezultate sledilnih poskusov z ocenjenimi generalnimi smermi, maksimalnimi in dominantnimi navideznimi hitrostmi toka podzemne vode.

Na podlagi rezultatov, pridobljenih v tej študiji, lahko velikost in razprostranjenost zaledja z gotovostjo ocenimo le za Žegnan studenec. Da bi to lahko naredili tudi za Župnekovo žrelo so potrebne dodatne raziskave vsaj v smeri severno in zahodno od obravnavanega območja ter dodatno spremljanje naravnih sledil v vodi v kombinaciji z dodatnim sledilnim poskusom.

Ker v krasu prispevnih območij ne moremo preprosto začrtati po topografskih vrhovih, se navadno opiramo na okvirne meje prispevnega zaledja (Goldscheider in Drew, 2007). Ta je bila za Žegnan studenec narejena na podlagi geološkega kartiranja litoloških enot, rezultatov sledilnih poskusov in informacij zvezno opazovanih fizikalno-kemijskih lastnosti izvirske vode. Pri tem smo si pomagali tudi z okvirnimi izračuni velikosti prispevnega območja na podlagi vodne bilance, ki temelji na obdobju med 23. januarjem 2019 in 31. majem 2020. Količina padavin je v tem obdobju znašala 1590 mm, vrednost evapotranspiracije pa 1106 mm.

Zaradi zmanjšanja vpliva razlik v količini vode, ki je uskladiščena v vodonosniku, običajno vodno bilanco računamo za obdobje hidrološkega leta med dvema minimumoma pretokov, a v obravnavanem primeru meritve niso potekale dovolj dolgo. Glede na hidrološke razmere ob začetku in koncu obdobja opazovanja pa ocenjujemo, da je bila razlika v količini uskladiščene vode relativno majhna in je tudi to obdobje primerno za oceno vodne bilance. Glede na ocenjene pretočne vrednosti izvirov ocenjujemo, da je velikost prispevnega območja izvirov okoli 3 km^2.

6. SKLEPI

Predstavljena študija je potrdila, da na obravnavanem območju prevladujejo kompleksne hidrogeološke razmere, ki so v največji meri posledica pestre litološke, delno pa tudi tektonske zgradbe območja. Oba dejavnika sta razlog za močno zakraselost nekaterih hidrogeoloških enot, kar pogojuje vrsto ter dinamiko odtoka podzemnih vod na večjem delu obravnavanega območja. Prevladujejo zakrasele karbonatne kamnine, na katerih površinska voda ponikne in odteka vertikalno skozi t.i. nezasičeno cono vodonosnika. Izvira Rečice se pojavita na stiku karbonatnih kamnin s kamninami slabših prepustnosti. Mestoma se tudi v njunem zaledju pojavljajo manjše zaplate manj ali slabo prepustnih plasti. Tam se pojavlja površinska rečna mreža. Manjši vodotok pa v stiku z apnenci vsaj deloma ponika v podzemlje.

Ker v zaledju opazovanih izvirov ni vodnih jam ali drugih vodnih objektov, na podlagi katerih bi sklepali o debelini nezasičene cone, te informacije ne moremo z gotovostjo podati. Glede na morfološke značilnosti terena in druge hidrološke značilnosti območja sklepamo, da je nezasičena cona lahko debela tudi do nekaj sto metrov.

Župnekovo žrelo deluje kot prelivni izvir vode iz sistema in ima hkrati večje zaledje od Žegnanega studenca, ki je mestoma tudi manj zakraselo. Hitrost toka podzemne vode proti Žegnanemu studencu, ki je bila dokazana s sledilnim poskusom, je zelo visoka, ob višjih vodostajih tudi do 49 m/h. Opisano zaznavanje sledila nakazuje na to, da se v podzemlju voda pretaka po razširjenih in zelo dobro povezanih kanalih, ter da lahko katerokoli onesnaženje zelo hitro, slabo razredčeno in brez pomembnejšega delovanja zaviralnih procesov (sorpcija, ipd.) doseže izvir. Odtok proti Župnekovem žrelu pa je precej pogojen s hidro-meteorološkimi razmerami.

Ocenjujemo, da gre v zaledju izvirov Rečice z vidika ranljivosti vodonosnih sistemov v splošnem za zelo občutljivo kraško območje, v katerem morebitni onesnaževalci v zaledju predstavljajo veliko tveganje za kakovost vode v izvirih. Deloma gre lahko za zelo hiter prenos onesnaževal proti izvirom, lahko pa se dlje časa kopičijo v manj zakraselih predelih podzemlja in jih šele obilnejše deževje izpere proti izvirom.

V primeru odločitve, da se katerikoli od opazovanih izvirov ponovno začne izrabljati za potrebe oskrbe prebivalcev z vodo, bi bilo potrebno opredeliti možne vplive tega posega na obstoječe količinsko stanje vode. Na osnovi dognanj, opisanih v tem poročilu, bi ju bilo potrebno primerno zaščititi, opravljanje aktivnosti v zaledjih pa prilagoditi visoki ranljivosti njunega zaledja.

7. ZAHVALA

Avtorji se zahvaljujemo financerjem projekta, vodilnemu partnerju Občini Rečica ob Savinji in sodelujočim partnerjem. Študija je bila izvedena z dodatno pomočjo finančnih sredstev in programske opreme raziskovalnega programa Raziskovanje krasa P6-0119 Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije, projektov Razvoj raziskovalne infrastrukture za mednarodno konkurenčnost slovenskega RRI prostora RI-SI-EPOS in RI-SI-LifeWatch Ministrstva Republike Slovenije za izobraževanje, znanost in šport in Evropske unije iz Evropskega sklada za regionalni razvoj ter evropske raziskovalne infrastrukture eLTER RI: Long-Term Ecosystem, critical zone and socio-ecological systems in LifeWatch ERIC: e-Science and Technology European Infrastructure for Biodiversity and Ecosystem Research.

8. VIRI IN LITERATURA

ARSO, 2019: Lidar mreža podatkov, listi 493_133, 494_133 in 493_132. Medmrežje: https://gis.arso.gov.si. Citirano 24. november 2019.

ARSO, 2020a: Arhiv hidroloških podatkov. Medmrežje: http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/. Citirano 4. april 2020.

ARSO, 2020b: Arhiv meteoroloških podatkov. Medmrežje: http://meteo.arso.gov.si/met/sl/archive/. Citirano 4. april 2020.

ARSO, 2020c: Referenčna evapotranspiracija in padavine samodejnih postaj (dnevni podatki od leta 2017). Medmrežje: https://meteo.arso.gov.si/met/sl/agromet/data/arhiv_etp/. Citirano 13. april 2020.

Behrens, H., Beims, U., Dieter, H., Dietze, G., Eikmann, T., Grummt, T., Hanisch, H., Henseling, H., Käß, W., Kerndorff, H., 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(3), 321-325.

Buser, S., Ferjančič, L., Grad, K., Turnšek, D., Mencej, Z., Orehek, A., Pavlovec, R., Pleničar, M., Prestor, M., Rijavec, J. & Šribar, L., 1967: Osnovna geološka karta SFRJ. Zvezni geološki zavod, List Ravne na Koroškem L33–54. Beograd.

eGeologija, 2019: Osnovna geološka karta SFRJ, List Ravne na Koroškem L33–54. Medmrežje: https://egeologija.si/. Citirano 24. marec 2020.

Equipco Services, 2020: Isco Product Data – Isco 6700 Full-size Portable Sampler. Medmrežje: http://www.equipcoservices.com/pdf/datasheets/isco_6700.pdf. Citirano 29. marec 2020.

Goldscheider, N. & Drew, D., 2007: Methods in Karst hydrogeology: IAH: international contributions to hydrogeology, 26. CRC Press, 264 str.

Goldscheider, N., 2008: A new quantitative interpretation of the long-tail and plateau-like breakthrough curves from tracer tests in the artesian karst aquifer of Stuttgart, Germany. Hydrogeology journal, 16(7), 1311.

Gotschy, 2020: Markierungsversuche und Abflussmessunge. Medmrežje: http://gotschy.at/markierungsversuche/. Citirano 29. marec 2020.

GURS, 2019: Temeljni topografski načrt 1:10.000, list F070920. Medmrežje: https://www.e-prostor.gov.si/. Citirano 24. november 2019.

GURS, 2020: Temeljni topografski načrt 1:5.000. Medmrežje: https://www.e-prostor.gov.si/. Citirano 24. marec 2020.

Käss, W., 1998: Tracing techniques in Geohydrology. AA Balkema, Rotterdam, PB, 573 str.

Kataster jam, 2019. Kataster jam Inštituta za raziskovanje krasa ZRC SAZU in Jamarske zveze Slovenije. Postojna, Ljubljana.

Mencej, Z. & Marinko, M., 1978: Hidrogeološke razmere na vodozbirnem področju izvirov »Župnekovo žrelo« in »Žegnani studenec« s predlogom varstvenih pasov. Geološki zavod Ljubljana, 4 str.

Novak, D., 2002: Hidrogeološke raziskave v zaledju izvira Župnekovo žrelo. Varstvo narave, 19.

ONSET Comp, 2020a: HOBO® U20 Water Level Logger (U20-001-0x and U20-001-0x-Ti) Manual. Medmrežje: https://www.onsetcomp.com/files/manual_pdfs/12315-J%20U20%20Manual.pdf. Citirano 24. marec 2020.

ONSET Comp, 2020b: HOBO® U24 Conductivity Logger (U24-001) Manual. Medmrežje: https://www.onsetcomp.com/files/manual_pdfs/15070-J%20U24-01%20Manual.pdf. Citirano 24. marec 2020.

Perkin Elmer, 2020: The LS-55 and LS-45 Fluorescence Spectrometers. Medmrežje: https://www.perkinelmer.com/lab-solutions/resources/docs/BRO_LS-55andLS-45FluorescenceSpectrophotometer.pdf. Citirano 29. marec 2020.

Petrič, M., & Kogovšek, J., 2010: Water temperature as a natural tracer–a case study of the Malenščica karst spring (SW Slovenia). Geologia Croatica, 63(2), 171-177.

Ravbar, N., Engelhardt, I. & Goldscheider, N., 2011: Anomalous behaviour of specific electrical conductivity at a karst spring induced by variable catchment boundaries: the case of the Podstenjšek spring, Slovenia. Hydrological Processes, 25(13), 2130-2140.

Ravbar, N., Petrič, M., Blatnik, M. & Švara, A., 2019: Projekt Žegnan studenec. Hidrogeološke raziskave. Pod Rečiškim zvonom, 13(2), 11-12.

Uradni list RS, 1987: Odlok o varstvenih pasovih vodnega vira Župnekovo žrelo in Žegnani studenec. Uradni list RS, št. 13/87.

Uradni list RS, 2012: Uredba o oskrbi s pitno vodo. Uradni list RS, št. 88/12.

Xylem Analytics, 2020: Multi-parameter portable meter MultiLine® Multi 3620 IDS. Medmrežje: https://www.xylemanalytics.com/en/general-product/id-431/multi-parameter-portable-meter-multiline%C2%AE-multi-3620-ids. Citirano 29. marec 2020.