

I test di tracciamento

Sledilni poskusi

JANJA KOGOVŠEK, METKA PETRIČ
Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU

5.1 Introduzione

Il collegamento ipogeo tra il Reka e le sorgenti del Timavo è noto già nella letteratura antica (Kranjc, 2000). All'inizio del XIX secolo tale collegamento è stato confermato con le prime prove di tracciamento (Timeus, 1928). L'uso di vari traccianti ha svelato i collegamenti del Reka dall'inghiottitoio in corrispondenza delle Grotte di San Canziano attraverso le grotte di Kanjaduce e l'Abisso di Trebiciano fino alle Sorgenti del Timavo e ad altre sorgenti minori presenti nel Golfo di Trieste. Le velocità di flusso sono variabili, dai 47 m/h in magra, ai 300 m/h in piena (Timeus, 1928; Mosetti, 1965; Peric et al., 2012). Anche le acque che si disperdono in corrispondenza degli inghiottitoi sul Vipacco attraversano l'acquifero carsico fino al lago di Doberdò raggiungendo le sorgenti del Timavo (Timeus, 1928). Habič (1989) ha messo in luce la presenza di collegamenti tra gli inghiottitoi presso la Raša, Sajevški potok e Senožeški potok con le Sorgenti del Timavo, le sorgenti di Aurisina, quelle di Sardos e quelle di Moschenizze Nord, ma i risultati non sono mai stati presentati in dettaglio. È dimostrato che dalla zona della discarica di Sežana le acque defluiscono verso le sorgenti del Timavo, Aurisina e Sardos; una prova di tracciamento eseguita nel 2005 ha rivelato velocità di flusso apparenti fino a 40 m/h (Kogovšek & Petrič, 2007). Le prove di tracciamento succitate hanno dimostrato in modo affidabile l'esistenza di collegamenti nel tratto meridionale dell'acquifero carsico.

Le direzioni di deflusso del Reka dall'inghiottitoio di San Canziano fino alle sorgenti sono già state dimostrate in passato con numerose prove di tracciamento. Meno noto è invece il percorso nella più ampia

5.1 Uvod

Podzemna vodna zveza ponikalnice Reke in izvirov Timave je bila omenjena že v antični literaturi (Kranjc, 2000), v začetku 20. stoletja pa je bila povezava potrjena s prvimi sledilnimi poskusi (Timeus, 1928). Z uporabo različnih sledil so bile ugotovljene povezave Reke od ponora v Škocjanske jame skozi Jamo v Kanjaducah in Labodnico do Timave in drugih izvirov v Tržaškem zalivu z navideznimi hitrostmi od 47 m/h ob nizkih vodostajih do 300 m/h ob visokih (Timeus, 1928; Mosetti, 1965; Peric et al., 2012). Tudi vode, ki ponikajo v strugi Vipave, odtekajo skozi vodonosnik Krasa do Doberdobskega jezera in izvirov Timave (Timeus, 1928). Habič (1989) je poročal o povezavah ponikalnic Raša, Sajevški in Senožeški potok z izviri Timava, Nabrežina, Sardoč in Moščenice S, bolj podrobni rezultati pa niso bili predstavljeni. Z odlagališča pri Sežani se vode dokazano stekajo proti izvirov Timava, Nabrežina in Sardoč, ob sledilnem poskusu v letu 2005 so bile ugotovljene navidezne hitrosti do 40 m/h (Kogovšek & Petrič, 2007). Z omenjenimi sledenji so bile zanesljivo dokazane podzemne vodne zveze v južnem delu vodonosnika Krasa, pri novem sledilnem poskusu pa smo z namenom določitve značilnosti pretakanja vode v širšem območju obe injicirni mesti pomaknili bolj proti severu.

area dell'acquifero carsico verso nord. Per questo motivo si è deciso di realizzare, nell'ambito del Progetto HYDROKARST, una nuova prova di tracciamento che coprisse e permettesse ai ricercatori di caratterizzare anche quest'area.

5.2 L'iniezione e il campionamento

In seguito alle notevoli piogge nella seconda metà di marzo 2013, la portata del corso del Timavo ha toccato il 2 aprile 2013 i 134 m³/s. Il 10 aprile 2013, durante la fase di calo, sono stati iniettati 48 kg di uranina nel pozzo presso Štorje alla profondità di 200 m, profondità alla quale è stata identificata la presenza della falda e la presenza di fratture e condotti carsici.

5.2 Injiciranje in vzorčenje

Po pogostih padavinah v drugi polovici marca 2013 je pretok Timave 2. aprila 2013 dosegel 134 m³/s. V času upadanja smo 10. aprila 2013 injicirali 48 kg uranina v 200 m globoko vrtino pri Štorjah (Štorje-1/12), kjer je diagram nihanja nivoja vode pokazal na dobro komunikacijo vrtine z okolico. Z namenom določitve značilnosti podzemnega pretakanja v prispevnem zaledju črpališča Klariči smo na isti dan pri Selih na Krasu (2,5 km severovzhodno in približno 230 m nad gladino vode v črpališču) injicirali 1,1 kg amidorodamina G na površju, kjer je predhodno zalivanje z vodo iz cisterne pokazalo dobro požiralnost. Že pred injiciranjem smo začeli z ročnim ali avtomatskim vzorčenjem na izbranih izviri (Timava, Nabrežina, Sardoč, Moščenice N in S, Prelostno jezero), v črpališču Klariči, v vrtinah (P1 – Pliskovica, V2 – Avber, B7 – Klariči) in v pod-

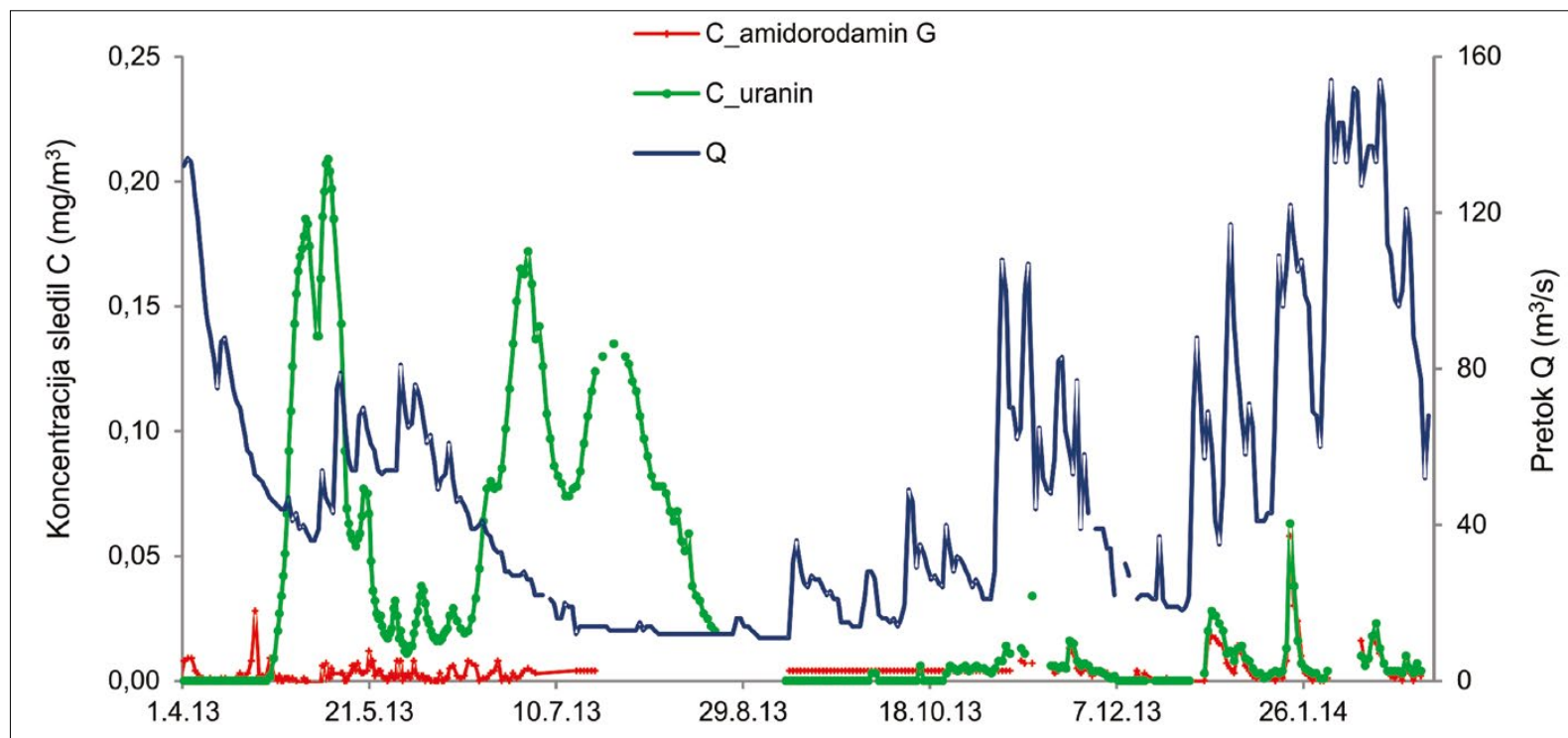


Figura 5.1
Il flusso e il rilascio di uranina e amidorodamina G attraverso le Sorgenti del Timavo negli 11 mesi successivi all'iniezione.

Slika 5.1
Pretok in iztekanje uranina ter amidorodamina G skozi izvir Timava v obdobju 11 mesecev po injiciranju.

A Sela na Krasu (2,5 km a nord-est e circa 230 m s.l.m.), in corrispondenza di un inghiottitoio carsico dove una precedente prova infiltrometrica con acqua di cisterna aveva messo in evidenza un notevole grado di permeabilità, sempre il 10 aprile è stato iniettato 1,1 kg di amidorodamina G. Questo secondo test di tracciamento aveva come scopo la definizione delle caratteristiche del flusso sotterraneo anche nell'area dove è ubicata la stazione di pompaggio di Klariči.

Prima dell'iniezione è partita una campagna di campionamenti manuali e automatici su sorgenti selezionate (Timavo, Aurisina, Sardos, Moschenizze Nord e Sud, Lago di Pietrarossa), presso la stazione di pompaggio di Klariči, nei piezometri (P1 – Pliskovica, V2 – Avber, B7 – Klariči) e nelle grotte (Kanjaduce, Kačna jama/Abisso dei Serpenti, Abisso di Trebiciano/Labodnica, Cavernetta di Comarie/Jama pri Komarjih). Alle Sorgenti del Timavo e alla stazione di pompaggio di Klariči si sono svolte anche delle misurazioni parallele con due fluorimetri da campo Gotschy Optotechnik LLF-M.

I campioni raccolti sono stati analizzati in laboratorio con lo spettrometro a fluorescenza Perkin Elmer LS 45. L'uranina è stata rilevata a E_{ex} 492 nm e E_{em} 512 nm, l'amidorodamina G a E_{ex} 532 nm e E_{em} 552 nm.

5.3 I risultati del test di tracciamento

Le prime tracce di uranina sono state rilevate alle Sorgenti del Timavo il 25 aprile 2013, 15 giorni dopo l'iniezione in corrispondenza del calo del flusso idrico. Successivamente si è verificato il primo arrivo massiccio di tracciante con due picchi, durata 1 mese (Figura 5.1). Il Timavo ha raggiunto la massima concentrazione di uranina, ossia 0,21 mg/m³, il 10 maggio 2014, 15 giorni dopo la prima rilevazione, quando il suo flusso iniziava ad aumentare. L'aumento del flusso ha poi provocato un calo della concentrazione dovuto alla notevole diluizione. In seguito alla costante diminuzione delle portate e alla scarsità di precipitazioni, il secondo importante arrivo del tracciante si è verificato agli inizi di luglio. La sua tracciabilità è rimasta evidente per ben 2 mesi con due picchi (Figura 5.1). In occasione del primo picco del 2 luglio 2013 è stata raggiunta

zemnih vodnih jamah (Jama v Kanjaducah 1, Kačna jama, Labodnica, Jama pri Komarjih). Na izviri Timava in v črpališču Klariči smo opravljali tudi vzporedne meritve s terenskima fluorimetroma Gotschy Optotechnik LLF-M.

Zajete vzorce smo analizirali v laboratoriju s fluorescenčnim spektrometrom Perkin Elmer LS 45. Uranin smo določevali pri E_{ex} 492 nm in E_{em} 512 nm, amidorodamin G pa pri E_{ex} 532 nm in E_{em} 552 nm.

5.3 Rezultati sledenja

Prve sledi uranina smo zaznali v izviri Timava 25. aprila 2013, 15 dni po injiciranju ob upadanju pretoka. Oblikoval se je prvi sledilni val z dvema vrhovoma, ki je trajal 1 mesec (Slika 5.1). Največjo koncentracijo uranina 0,21 mg/m³ je Timava dosegla 10. maja 2013, 15 dni po prvem pojavu, ko je njen pretok začel naraščati. Naraščanje pretoka je nato povzročilo upadanje koncentracije zaradi velikih razredčitev. Ob nadaljnjem stalnem upadanju pretoka in skromnih padavinah se je oblikoval drugi sledilni val z dvema vrhovoma, ki je trajal kar 2 meseca. V prvem vrhu 2. julija 2013 je bila dosežena koncentracija uranina 0,17 mg/m³, v drugem 25. julija 2013 pa 0,135 mg/m³. Glede na maksimalno doseženo koncentracijo znaša dominantna hitrost pretakanja 38 m/h, maksimalna hitrost glede na prvi pojav pa kar 75 m/h (Tabela 5.1).

Po 4-mesečnem izrazitem pojavljanju sledila v izviri Timava (od maja do avgusta 2013) smo nato vse do novembra 2013 beležili koncentracije na meji določljivosti, kar pomeni, da je bil prenos minimalen oz. je izostal. Šele po padavinah novembra in kasneje od konca decembra 2013 naprej, ko so bili doseženi najvišji pretoki v obdobju opazovanja, je prišlo do občasnih manjših zveznih povečanj koncentracije uranina. Vzrok je bilo spiranje zaostalega uranina ob velikih razredčitvah. V drugi polovici februarja 2014 je koncentracija upadla pod mejo določljivosti. Sklepamo, da se je manjši prenos uranina nadaljeval še po vsakih izdatnejših padavinah, a v zelo nizkih koncentracijah. Ob velikih pretokih v januarja 2014 smo izmerili tudi manjša povečanja amidorodamina G, a to povezavo bi bilo potrebno zaradi majhne količine injiciranega sledila še preveriti.

una concentrazione di uranina di 0,17 mg/m³. In occasione del secondo picco del 25 luglio 2013 invece è stato raggiunto un livello pari allo 0,135 mg/m³. Considerando la concentrazione massima raggiunta, la velocità dominante di flusso è stata calcolata pari a 38 m/h, con punte che hanno raggiunto, in fase di piena, i 75 m/h (Tabella 5.1).

Dopo 4 mesi di evidente presenza del tracciante in corrispondenza delle Sorgenti del Timavo (da maggio ad agosto 2013) abbiamo registrato fino a novembre 2013 delle concentrazioni ai limiti della rilevabilità, il che significa che, in quel periodo, il trasporto è stato minimo o assente. Solo in seguito alle precipitazioni di novembre e, successivamente, dalla fine di dicembre 2013 in poi, sono stati raggiunti i livelli massimi di flusso durante il periodo studiato e, conseguentemente, si sono verificati lievi e sporadici aumenti del livello di uranina. La causa è il dilavamento

Izračun povrnjene količine je pokazal, da je do konca februarja 2014 izteklo skozi izvir Timava blizu 70 % injiciranega uranina (Slika 5.2).

Hitremu pojavu uranina v Timavi je sledil po nadaljnjih 10 dneh tudi pojav v izviru Nabrežina. Tudi v tem primeru je imel prvi sledilni val dva vrha, a je trajal le pol meseca. Hitrosti pretakanja proti Nabrežini so bile manjše, dominantna hitrost je bila 25 m/h (Tabela 5.1), predvsem pa je bila več kot dvakrat manjša maksimalna hitrost (le 34 m/h). Ker nimamo podatkov o pretoku, deleža povrnjenega sledila nismo mogli izračunati.

V črpališču Klariči so tako koncentracije uranina kot amidorodamina G nihale okoli meje določljivosti, zato povezave z injiciranimi mestoma ni mogoče potrditi. Sklepamo lahko, da v tem vodnem viru zajemajo predvsem vode, ki se stekajo z območja severno ali severozahodno od črpališča.

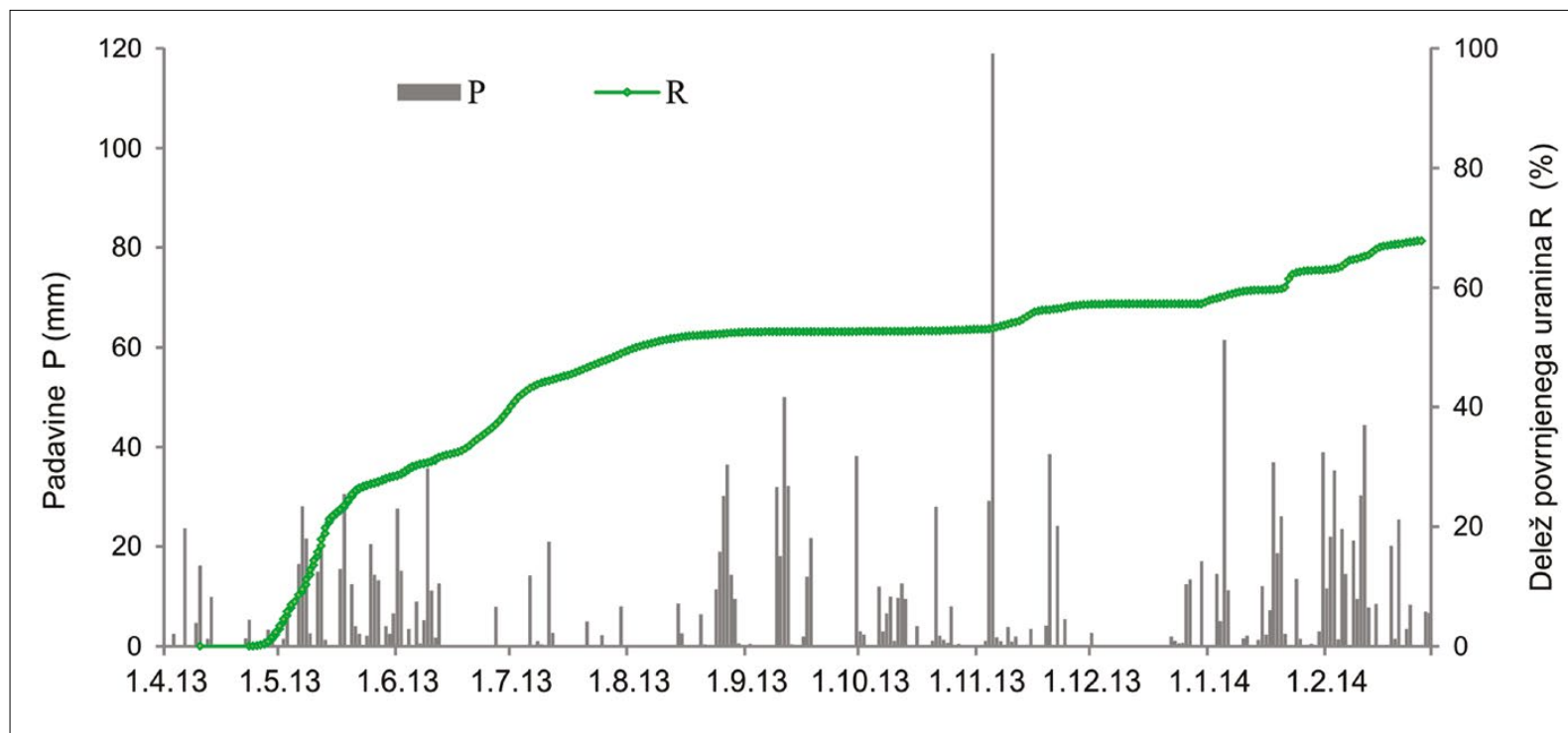


Figura 5.2
Precipitazioni nell'area della prova di tracciamento (stazione di Godnje) e quota di uranina restituita e defluita attraverso le Sorgenti del Timavo.

Slika 5.2
Padavine na območju sledilnega poskusa (postaja Godnje) in delež povrnjenega uranina, ki je izteklo skozi izvir Timava.

Tabella 5.1

Distanza dalla sorgente al punto di iniezione (D), concentrazione massima rilevata di uranina (C_{max}), tempo intercorso fino alla prima rilevazione (t_{min}), velocità massima rispetto al t_{min} (v_{max}), tempo impiegato fino al raggiungimento della concentrazione massima (t_{dom}), velocità dominante rispetto a t_{dom} (v_{dom}) e quota di uranina restituita (R).

Tabela 5.1

Razdalja od izvira do injicirne točke (D), maksimalna izmerjena koncentracija uranina (C_{max}), čas do prvega pojava uranina (t_{min}), največja hitrost glede na t_{min} (v_{max}), čas do največje koncentracije uranina (t_{dom}), dominantna hitrost glede na t_{dom} (v_{dom}) in delež povrnjenega uranina (R).

Izvir	D (km)	C_{max} (mg/m ³)	t_{min} (dan)	v_{max} (m/h)	t_{dom} (dan)	v_{dom} (m/h)	R (%)
Timava	27,0	0,21	15	75	30	38	70
Nabrežina	20,4	0,18	25	34	34	25	

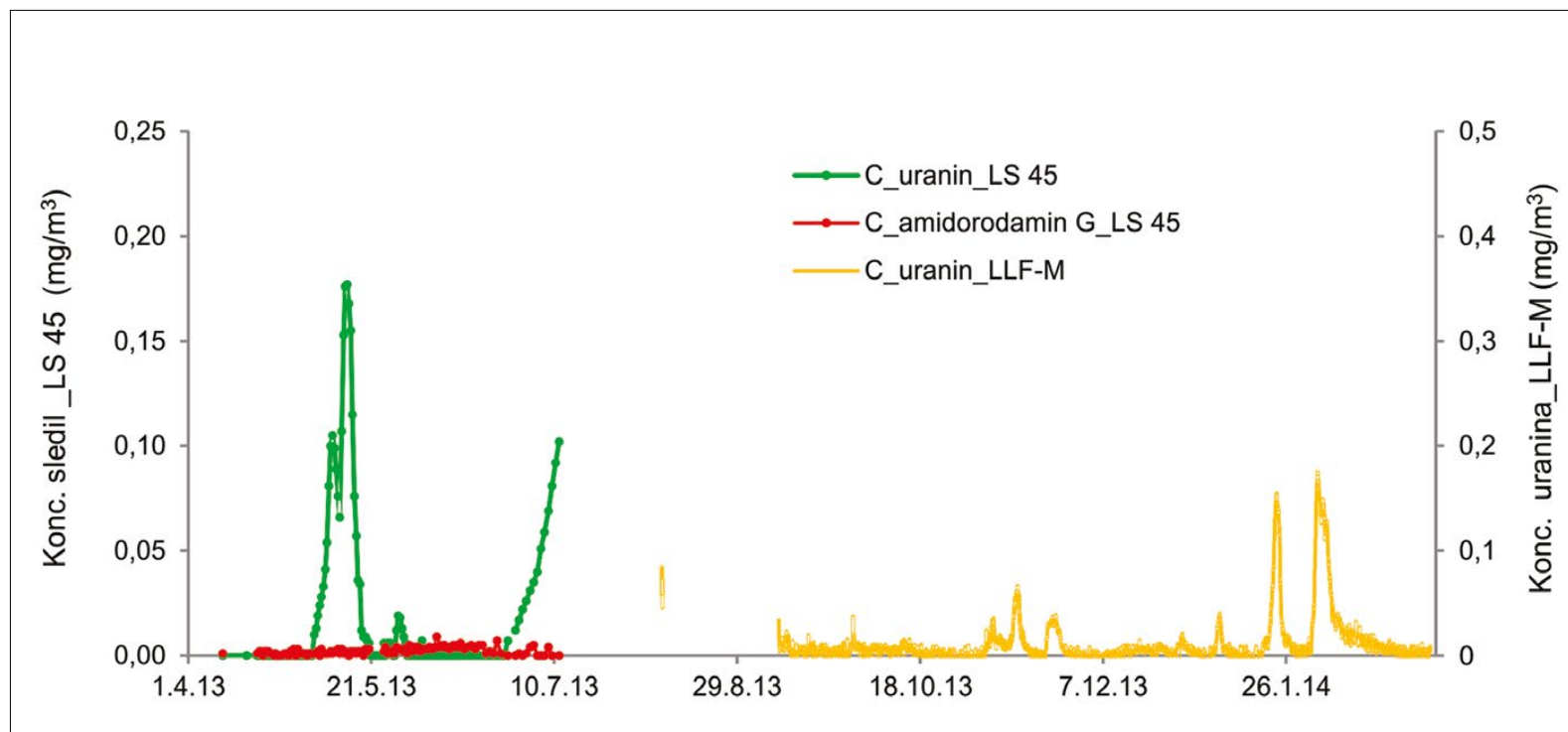


Figura 5.3
Concentrazioni di uranina (misurate con LS 45 in laboratorio e con fluorimetro da campo LLF-M) e di amidorodamina G alle sorgenti di Aurisina.

Slika 5.3
Koncentracije uranina (merjene z laboratorijskim LS 45 in terenskim fluorimetrom LLF-M) in amidorodamina G v izvihu Nabrežina.

dell'uranina residua e abbondantemente diluita. Nella seconda metà di febbraio 2014 la concentrazione si è ridotta al di sotto della soglia di rilevanza. È possibile dedurre che il ridotto flusso di uranina sia proseguito anche in seguito ad ogni evento importante di precipitazione, anche se in concentrazioni molto basse. In occasione dell'aumento del flusso avvenuto nel gennaio 2014 sono stati registrati anche dei lievi aumenti del livello di amidorodamina G, ma a causa del ridotto quantitativo del tracciante rilevato, la correlazione va verificata con nuovi test più mirati.

Il calcolo della quantità restituita ha rivelato che entro la fine di febbraio 2014 le Sorgenti del Timavo hanno rilasciato il 70% dell'uranina iniettata (Figura 5.2).

La rapida apparizione dell'uranina nel Timavo è stata seguita, a 10 giorni di distanza, dalla comparsa presso le sorgenti di Aurisina. Anche in questo caso l'ondata di tracciante è avvenuta con 2 picchi, ma è durata soltanto 2 settimane. Le velocità di flusso verso Aurisina sono state minori, la velocità media è stata di 25 m/h (Tabella 5.1) e quella massima è risultata pari a 34 m/h. Non avendo a disposizione dati sul flusso, non è stato possibile calcolare la quota del tracciante restituito.

Nella stazione di pompaggio di Klariči sia la concentrazione di uranina che quella di amidorodamina G si aggiravano intorno alla soglia di percettibilità, perciò non è stato possibile confermare i collegamenti con i punti di iniezione. Né è possibile dedurre che in questo pozzo si raccolgano soprattutto le acque derivanti dall'area sita a nord e nord-ovest del serbatoio.

Le analisi dei campioni degli altri punti di prelievo non hanno evidenziato alcuna traccia della presenza dei traccianti iniettati. Alla sorgente di Sardos sono state rilevate, durante i tre mesi di monitoraggio, solo variazioni minime in prossimità della soglia di rilevanza; né è possibile dedurre che non esista un collegamento con i punti di iniezione. Nel piezometro P1 di Pliskovica sono stati prelevati dei campioni fin dai tempi del primo arrivo del tracciante alle Sorgenti del Timavo, ma non è stato registrato alcun aumento del contenuto di uranina.

Analize vzorcev z ostalih zajemnih mestih niso pokazale prisotnosti injiciranih sledil. V izvirov Sardoč smo v trimesečnem podrobnem vzorčenju zabeležili le minimalna nihanja na meji določljivosti, tako da ugotovljamo, da ne obstaja vodna povezava z injiciranimi mestoma. V vrtini P1 pri Pliskovici smo podrobno vzorčili še v času sledilnega vala v Timavi, vendar nismo zabeležili povišanj vsebnosti uranina.

5.4 Sklep

Sledenje z amidorodaminom G v bližini črpališča Klariči ni pokazalo povezave s tem vodnim virom, saj smo izmerili le nihanje koncentracije na meji določljivosti. Potrditve najbolj verjetne smeri toka proti izvirov Timava zaradi majhne količine injiciranega sledila nismo pričakovali. Zabeležena manjša zvezna povečanja amidorodamina G v Timavi niso zadostna za potrditev te povezave.

Sledenje z območja Štorij je pokazalo na odtekanje podzemne vode proti izvirovoma Timava in Nabrežina z dominantnima hitrostima 38 m/h in 25 m/h. Te hitrosti so primerljive s tistimi, ki so bile za tok proti temu izvirov ugotovljene ob podobnih hidroloških razmerah pri injiciranju sledila na površju ob odlagališču odpadkov pri Sežani (Kogovšek & Petrič, 2007), podobna je tudi oblika krivulj koncentracij sledila. V obeh primerih sledilo ni bilo injicirano neposredno v glavni tok podzemne Reke, ampak se je z vodo v začetnem delu poti pretakalo z manjšo hitrostjo po nekoli-ko slabše prepustnih delih vodonosnika. Vseeno pa je zelo hitro doseglo izvira v Tržaškem zalivu. To potrjuje ugotovitve o veliki ranljivosti vodonosnika Krasa in nevarnosti, ki jo za kraške vode predstavlja morebitno onesnaženje na tem območju. Topno onesnaženje bi se v primerljivih razmerah širilo skozi vodonosnik v smeri izvirov Timava in Nabrežina z ugotovljenimi hitrostmi. V istih smereh bi potovalo tudi v vodi netopno onesnaženje (npr. naftni derivati), je pa dinamika tovrstnega prenosa še slabo raziskana.

5.4 Conclusioni

I test di tracciamento con l'amidorodamina G presso Sela na Krasu, non hanno evidenziato alcun collegamento con la stazione di pompaggio di Klariči, poiché sono state registrate solo delle concentrazioni ai limiti della rilevabilità. A causa dello scarso quantitativo di tracciante iniettato, non ci si aspettava una conferma della direzione del flusso verso le Sorgenti del Timavo, ritenuta la più probabile. I piccoli aumenti della concentrazione di amidorodamina G nel Timavo non sono sufficienti per confermare la connessione tra i 2 punti.

Il tracciamento effettuato nei pressi del pozzo di Štorje ha rivelato che il flusso sotterraneo avviene in direzione delle sorgenti del Timavo e di quelle di Aurisina, con velocità di deflusso dominanti pari a di 38 m/h e 25 m/h rispettivamente. Queste velocità sono paragonabili a quelle già registrate per il flusso verso questi punti di sorgenza in simili condizioni idrologiche come ad esempio quelle avvenute in seguito all'immissione del tracciante in superficie nella discarica di Sežana (Kogovšek & Petrič, 2007); anche l'andamento delle curve relative alla concentrazione del tracciante è simile. In entrambi i casi il tracciante non è stato iniettato direttamente in uno dei condotti principali del Timavo. Il tracciante immesso è stato infatti dilavato nel tempo a velocità contenute dalle acque di infiltrazione e di deflusso attraverso condotti secondari e/o fratture beanti; nonostante ciò ha raggiunto le sorgenti nel Golfo di Trieste in tempi molto rapidi. Questo conferma le ipotesi sulla notevole vulnerabilità dell'acquifero carsico e sul pericolo rappresentato per le acque carsiche da un eventuale inquinamento dell'area in questione. In circostanze analoghe, gli inquinanti solubili potrebbero diffondersi attraverso l'acquifero verso le sorgenti del Timavo e di Aurisina con le velocità che sono state registrate. Anche gli inquinanti non solubili (p. es. i derivati del petrolio) si diffonderebbero nella medesima direzione, sebbene le dinamiche del loro trasporto siano ancora scarsamente studiate.



Figura 5.4
L'iniezione di
aminorodamina G.

Slika 5.4
Sledenje z
amidorodaminom G.



Figura 5.5
L'iniezione di uranina nel
pozzo di Štorje.

Slika 5.5
Sledenje z uranine
Štorije.



Il proteo (*Proteus anguinus*) a Trebiciano.

Proteus (Proteus anguinus) pri Trebčah.