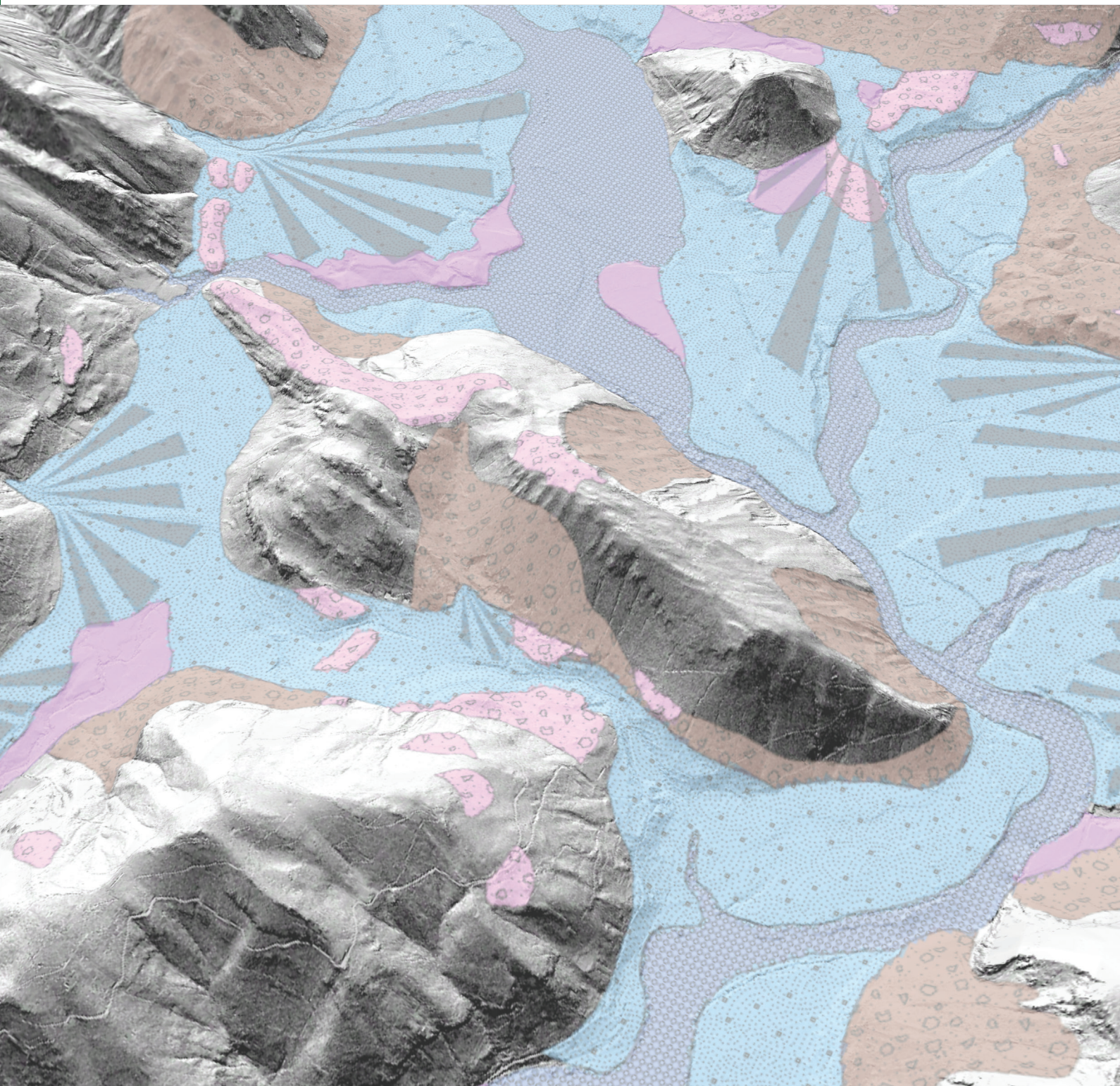


GEOLOGIJA

2020 | št.: **63/2**



ISSN

Tiskana izdaja / Print edition: 0016-7789

Spletna izdaja / Online edition: 1854-620X

GEOLOGIJA

63/2 – 2020



GEOLOGIJA	2020	63/2	173-345	Ljubljana
------------------	-------------	-------------	----------------	------------------



Izdajatelj: Geološki zavod Slovenije, zanj direktor MILOŠ BAVEC

Publisher: Geological Survey of Slovenia, represented by Director MILOŠ BAVEC

Financirata Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije in Geološki zavod Slovenije

Financed by the Slovenian Research Agency and the Geological Survey of Slovenia

Glavna in odgovorna urednica / Editor-in-Chief: MATEJA GOSAR

Tehnična urednica / Technical Editor: BERNARDA BOLE

Uredniški odbor / Editorial Board

DUNJA ALJINOVIC

Rudarsko-geološki naftni fakultet, Zagreb

MARIA JOÃO BATISTA

National Laboratory of Energy and Geology, Lisbona

MILOŠ BAVEC

Geološki zavod Slovenije, Ljubljana

MIHAEL BRENCIČ

Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani

GIOVANNI B. CARULLI

Dip. di Sci. Geol., Amb. e Marine, Università di Trieste

KATICA DROBNE

Znanstvenoraziskovalni center SAZU, Ljubljana

JADRAN FAGANELI

Nacionalni inštitut za biologijo, MBP, Piran

JANOS HAAS

Etvös Lorand University, Budapest

BOGDAN JURKOVŠEK

Geološki zavod Slovenije, Ljubljana

ROMAN KOCH

Institut für Paläontologie, Universität Erlangen-Nürnberg

MARKO KOMAC

Poslovno svetovanje s.p., Ljubljana

HARALD LOBITZER

Geologische Bundesanstalt, Wien

MILOŠ MILER

Geološki zavod Slovenije, Ljubljana

RINALDO NICOLICH

Università di Trieste, Dip. di Ingegneria Civile

SIMON PIRC

Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani

MIHAEL RIBIČIČ

Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani

NINA RMAN

Geološki zavod Slovenije, Ljubljana

MILAN SUDAR

Faculty of Mining and Geology, Belgrade

SAŠO ŠTURM

Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana

MIRAN VESELIČ

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani

Častni člani / Honorary Members

DRAGICA TURNŠEK

Slovenska akademija znanosti in umetnosti, Ljubljana

Naslov uredništva / Editorial Office: GEOLOGIJA Geološki zavod Slovenije / Geological Survey of Slovenia

Dimičeva ulica 14, SI-1000 Ljubljana, Slovenija

Tel.: +386 (01) 2809-700, Fax: +386 (01) 2809-753, e-mail: urednik@geologija-revija.si

URL: <http://www.geologija-revija.si/>

GEOLOGIJA izhaja dvakrat letno. / GEOLOGIJA is published two times a year.

GEOLOGIJA je na voljo tudi preko medknjižnične izmenjave publikacij. /

GEOLOGIJA is available also on exchange basis.



Izjava o etičnosti

Izdajatelj revije Geologija se zavedamo dejstva, da so se z naglim naraščanjem števila objav v svetovni znanstveni literaturi razmahnil tudi poskusi plagiatorstva, zlorab in prevar. Menimo, da je naša naloga, da se po svojih močeh borimo proti tem pojavom, zato v celoti sledimo etičnim smernicam in standardom, ki jih je razvil odbor COPE (Committee for Publication Ethics).

Publication Ethics Statement

As the publisher of Geologija, we are aware of the fact that with growing number of published titles also the problem of plagiarism, fraud and misconduct is becoming more severe in scientific publishing. We have, therefore, committed to support ethical publication and have fully endorsed the guidelines and standards developed by COPE (Committee on Publication Ethics).

Baze, v katerih je Geologija indeksirana / Indexation bases of Geologija: Scopus, Directory of Open Access Journals, GeoRef, Zoological Record, Geoscience e- Journals, EBSCOhost

Cena / Price

Posamezni izvod / Single Issue

Posameznik / Individual: 15 €

Institucija / Institutional: 25 €

Letna naročnina / Annual Subscription

Posameznik / Individual: 25 €

Institucija / Institutional: 40 €

Tisk / Printed by: GRAFIKA GRACER d.o.o.

Slika na naslovni strani: 3D model površja z označenimi kvartarnimi sedimenti na območju Tolmina in Mosta na Soči (Jamšek Rupnik in sod., članek v tej številki). Senčen relief in digitalen model višin izvirata iz LiDAR podatkov (Ministrstvo za okolje in prostor, ARSO, 2011).

Cover page: 3D model of landscape with mapped Quaternary deposits in the Tolmin and Most na Soči areas (Jamšek Rupnik et al., paper in this issue). Shaded relief and digital elevation model are derived from LiDAR data (Ministry of the Environment and Spatial Planning, Slovenian Environment Agency, 2011).

VSEBINA – CONTENTS

<i>Gaberšek, M., Grčman, H. & Gosar, M.</i> Mineralna sestava, pedološke lastnosti in frakcionacija izbranih kemičnih elementov v tleh v Mariboru	177
Mineral composition, pedological characteristics and fractionation of selected chemical elements in soil of Maribor	
<i>Čenčur Curk, B.</i> Sledilni poskus na odlagališču komunalnih odpadkov Dragonja	193
Tracer test on the Dragonja landfill	
<i>Petrič, M., Ravbar, N., Gostinčar, P., Krsnik, P. & Gacin, M.</i> Vzpostavitev prosto dostopne GIS zbirke rezultatov sledenj toka podzemne vode in možnosti njene uporabe	203
Establishment of a freely accessible GIS database containing the results of groundwater tracing and possibilities of its use	
<i>Gosar, M., Šajn, R., Miler, M., Burger, A. & Bavec, Š.</i> Overview of existing information on important closed (or in closing phase) and abandoned mining waste sites and related mines in Slovenia	221
Pregled obstoječih informacij o pomembnejših zaprtih (ali v fazi zapiranja) in opuščeni odlagališčih rudarskih odpadkov in z njimi povezanih rudnikov v Sloveniji	
<i>Nagode, K., Kanduč, T., Lojen, S., Bračič Železnik, B., Jamnik, B. & Vreča, P.</i> Synthesis of past isotope hydrology investigations in the area of Ljubljana, Slovenia	251
Pregled preteklih izotopskih hidroloških raziskav na območju Ljubljane, Slovenija	
<i>Turk, J., Urbanc, J., Mladenovič, A., Pavlin, A., Oprčkal, P., Fifer Bizjak, K., Likar, B., Brodnik, M. & Mali, N.</i> Izgradnja lizimetrov za preučevanje izpiranja potencialno nevarnih snovi iz gradbenih proizvodov	271
Construction of lysimeters for researching the leaching of potentially toxic elements from building materials	
<i>Serianz, L., Rman, N. & Brenčič, M.</i> Step-drawdown tests in exploitation wells for thermal and mineral water – Case study from Slovenia	281
Črpalni preizkusi v korakih v eksploatacijskih vodnjakih za rabo termalne in mineralne vode – študija primera Slovenije	
<i>Jamšek Rupnik, P., Žebre, M. & Monegato, G.</i> Late Quaternary evolution of the sedimentary environment in Modrejce near Most na Soči (Soča Valley, Julian Alps)	295
Poznokvartarni razvoj sedimentacijskega okolja v Modrejcah pri Mostu na Soči (Posočje, Julijske Alpe)	
<i>Križnar, M., Bricman, A. & Očepek, I.</i> Spodnjekredni heteromorfni amoniti (Ancyloceratina) z Leš pri Prevaljah (Severne Karavanke, SV Slovenija)	311
Lower Cretaceous heteromorph ammonites (Ancyloceratina) from Leše near Prevalje (North Karavanke Mts. NE Slovenia)	
<i>Master, S.</i> Peripatetic careers of Vsevolod and Eugenie Gorsky, mid-20th century Slovenian-educated geoscientists	323
Popotna kariera Vsevoloda in Evgenije Gorski, študentov geologije in rudarstva v Sloveniji na začetku 20. stoletja	

Nove knjige

Zupančič, N.,

Mihael Brenčič, 2019: Ljubljanska geološka šola: zgodovina poučevanja geologije na Univerzi v Ljubljani. UL, NTF, Ljubljana: 318 str. 333

Poročila

Zarnik, B.: Diorama karbonskega gozda v rudniku Sitarjevec 335

Bračič Železnik, B.: Poročilo o aktivnostih Slovenskega geološkega društva v letu 2019 336

Nekrolog

Zupančič, N. & Dobnikar, M.

V spomin Dragici Strmole 341

Brenčič, M.

V spomin Vladimirju Ferjančiču 342

Navodila avtorjem 344

Instructions for authors 345



Mineralna sestava, pedološke lastnosti in frakcionacija izbranih kemičnih elementov v tleh v Mariboru

Mineral composition, pedological characteristics and fractionation of selected chemical elements in soil of Maribor

Martin GABERŠEK¹, Helena GRČMAN² & Mateja GOSAR¹

¹Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, SI-1000 Ljubljana;
e-mail: martin.gabersek@geo-zs.si; mateja.gosar@geo-zs.si

²Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo, Katedra za pedologijo in varstvo okolja, Jamnikarjeva 101,
SI-1000 Ljubljana; e-mail: helena.grcman@bf.uni-lj.si

Prejeto / Received 23. 3. 2020; Sprejeto / Accepted 22. 5. 2020; Objavljeno na spletu / Published online 8. 7. 2020

Ključne besede: tla urbanih območij, rentgenska praškovna difrakcija, metoda zaporednih ekstrakcij, baker, svinec, cink

Key words: soil of urban areas, X-ray Powder Diffraction, sequential extraction procedure, copper, lead, zinc

Izvleček

Preučevali smo mineralno sestavo, pedološke lastnosti in frakcionacijo izbranih kemičnih elementov v tleh v Mariboru. Mineralna sestava odraža geogene dejavnike oz. prisotnost magmatskih in metamorfnih kamnin v okolici Maribora ter v porečju reke Drave. Največ je kremenca, sledijo plagioklazi, muskovit/illit, klorit in dolomit. Ponekod so prisotni tudi K-glinenci, amfiboli in kalcit. Relativno visoke pH vrednosti (6,9–7,4), visoke vsebnosti rastlinam dostopnega fosforja (13,5–185 mg/100 g tal) in kalija v nekaterih vzorcih kažejo na antropogen vpliv. Mediana vsebnosti organske snovi je 8 % in mediana deležev karbonatov 6,1 %. Največ vzorcev spada v teksturni razred peščene ilovice, sledi razred ilovice. Predhodne kemične analize so pokazale na visoke vsebnosti nekaterih potencialno strupenih elementov (PSE), predvsem Cu, Pb in Zn. Z metodo zaporednih ekstrakcij smo ugotavljali frakcionacijo As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb in Zn. Vsi PSE, z izjemo Mn, so v največji meri vezani na organsko snov in preostanek topen v zlatotopki, kar kaže na njihovo relativno močno vezavo na talne komponente. Še posebej močno vezani so As, Co, Cr in Ni. V 1. in 2. stopnji, ki predstavljata najlažje izmenljive oblike PSE, so ugotovljene vsebnosti praktično zanemarljive. Ti rezultati kažejo, da obravnavani PSE v mariborskih tleh ne predstavljajo tveganja za okolje.

Abstract

The mineral composition, pedological characteristics and fractionation of selected chemical elements in the soil of Maribor were studied. The mineral composition reflects geological factors, especially the presence of igneous and metamorphic rocks in the surroundings of Maribor and in the Drava River catchment. Quartz prevails, followed by plagioclases, muscovite/illite, chlorite and dolomite. Potassium feldspar, amphiboles and calcite are also present in some samples. Relatively high pH values (6.9–7.4), high contents of plant-available phosphorous (13.5–185 mg/100 g of soil) and potassium in some samples reflect the anthropogenic influence on the pedological characteristics. The medians of the organic matter and carbonate contents are 8 % and 6.1 %, respectively. The majority of the samples belong to the sandy loam texture class, followed by loam class. Previous chemical analyses showed high contents of some potentially toxic elements (PTEs), especially Cu, Pb and Zn. We determined the fractionation of As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb and Zn using a sequential extraction procedure. All PTEs, except Mn, are mostly bound to organic matter and residual fraction soluble in aqua regia, meaning that they are relatively strongly bound to soil components. Arsenic, Co, Cr and Ni are particularly strongly bound. The contents in the first and second stage, which represent the most easily exchangeable fractions of PTEs, are negligible. The results indicate that the contents of studied PTEs in the soil of Maribor do not pose an environmental threat.

Uvod

Poleg naravnih tlotvornih dejavnikov, na razvoj tal in njihove lastnosti močno vplivajo tudi antropogene dejavnosti. Te lahko mehansko uničijo tla, npr. z urbanizacijo, gradnjo prometnic, industrijskih objektov in druge infrastrukture, ali porušijo kemično ravnovesje tal z vnašanjem različnih organskih ter anorganskih snovi (Vidic et al., 2015; Vrščaj et al., 2017). Tla ogrožajo tudi naravni dejavniki, ki jih pogosto posredno povzroča človek (Lal, 1993). Na primer, vetrna in vodna erozija sta pogosto posledici nepremišljenih antropogenih posegov v prostor, kot je pretirano izsekavanje gozdov. Poslabšanje fizikalnih, kemičnih in bioloških lastnosti tal označujemo s pojmom degradacija.

Negativnim vplivom antropogenih aktivnosti so še posebej izpostavljena tla na urbanih območjih. Običajno ne izvirajo samo iz prepevanja matične podlage, ampak gre za mešanico prepevine, eksogenega materiala oz. materiala pripejanega iz neke druge lokacije (Wong et al., 2006), odpadnega gradbenega materiala, pepela, kosov asfalta, lesa, žlindre, stekla, plastike, kovinskih delcev, industrijskih in gospodinjskih odpadkov ter drugih antropogenih proizvodov (Craul, 1985; Howard & Orlicki, 2016). Kemične, mehanske in biološke lastnosti tal v urbanih okoljih so lahko povsem drugačne od naravnih: talni horizonti večinoma niso razviti ali so uničeni oz. premešani, vertikalna in prostorska spremenljivost tal je zelo velika, tla so zbita, na nepokritih delih se lahko razvije neprepustna skorja, kroženje vode in zraka je lahko omejeno, moteno je tudi kroženje hranil, omejen je prostor za razvoj koreninskih sistemov rastlin (Craul, 1985; Lehmann & Stahr, 2007; Yang & Zhang, 2015), značilen je tudi višji pH od tal okoliških neurbanih območij (Werkenthin et al., 2014; Yang & Zhang, 2015).

Tla v urbanih okoljih so običajno obremenjena z različnimi organskimi in anorganskimi snovmi, med drugim tudi s potencialno strupenimi elementi (PSE) (Wong et al., 2006; Hazelton & Murphy, 2011; Yang & Zhang, 2015). PSE niso (bio)razgradljivi, zato se, ob ustreznih fizikalno-kemičnih pogojih, v tleh akumulirajo. Tla so najpomembnejši kopenski ponor PSE (Wong et al., 2006), kjer se vežejo na različne talne komponente, kot so organska snov, aluminijevi, železovi in manganovi oksidi ter hidroksidi, glineni minerali in karbonati (Tack, 2010; Kabata Pendias, 2011). V talni raztopini lahko obstajajo kot prosti ioni in organski ter anorganski kompleksi (Impellitteri et al., 2001). Pomembnejše lastnosti tal, ki vplivajo na zadrževanje oz. sproščanje

PSE so: kislost/bazičnost (pH), redoks potencial (Eh), kationska izmenjalna kapaciteta, deleži in oblike organske snovi, Fe, Mn in Al oksidov ter hidroksidov in glinenih mineralov (Rieuwerts et al., 1998). Pod vplivom teh in še nekaterih drugih dejavnikov (npr. temperatura, vlažnost, delovanje bakterij), potekajo v tleh različne reakcije: adsorpcija/desorpcija, raztapljanje/obarjanje, tvorba anorganskih in organskih kompleksov, oksidacija/redukcija, izhlapevanje (Impellitteri et al., 2001; Tack, 2010; Kabata Pendias, 2011). Naštete lastnosti in procesi se prepletajo ter vplivajo eden na drugega, kar ustvarja kompleksen, dinamičen in heterogen sistem. Ob teh reakcijah se lahko spreminjajo kemične oblike PSE, kar vpliva na njihovo mobilnost in posredno na morebitno nevarnost za okolje ter strupenost za ljudi in druge organizme. Morebitno zadrževanje PSE v tleh po eni strani predstavlja varovalo pred trenutnim onesnaženjem podzemne vode, po drugi strani pa dolgoročno tveganje za okolje in ljudi, saj lahko ob spremembah fizikalno-kemičnih pogojev v tleh PSE preidejo iz stabilnih v mobilne oblike. Nevarnost predstavlja tudi prehod talnih delcev s PSE v človeški organizem. Visoke vsebnosti PSE v tleh omogočajo tudi posreden vpogled v pretekle antropogene dejavnosti in onesnaževanje okolja.

Za raziskavo smo izbrali tla v Mariboru, ki je drugo največje slovensko mesto. V preteklosti je bilo eno izmed najpomembnejših industrijskih središč tako Slovenije kot celotne Jugoslavije. Zaznamovali sta ga predvsem tekstilna in kovinska industrija, zgoščeni večinoma na treh industrijskih območjih: Melje, Tezno in Studenci. Nekatero pomembnejše tovarne, ki so delovale v Mariboru so: Tovarna avtomobilov Maribor (TAM), tovarna akumulatorjev Vesna, Mariborska livarna Maribor (MLM) in Metalna (zadnji dve še delujeta). Industrija ima danes v tem mestu manjši pomen kot v preteklosti, a je kljub temu ohranila pomemben status, predvsem na industrijskih območjih Melje in Tezno. Na območju nekdanjega TAM-a na Teznu se je razvila poslovno-proizvodna cona, v kateri deluje prek 200 podjetij, med drugim tudi tovarna avtobusov in druge tovarne s področja avtomobilske ter kovinsko-predelovalne industrije.

Geokemične lastnosti tal v Mariboru so bile že podrobno raziskane (Gaberšek & Gosar, 2018), zato se v tem članku posvečamo predvsem njihovim pedološkim lastnostim in frakcionaciji 10 PSE v izbranih vzorcih. Predstavljene raziskave so del doktorske disertacije z naslovom »Celostna obravnava geokemije trdnih anorganskih delcev v urbanem okolju« (Gaberšek, 2020).

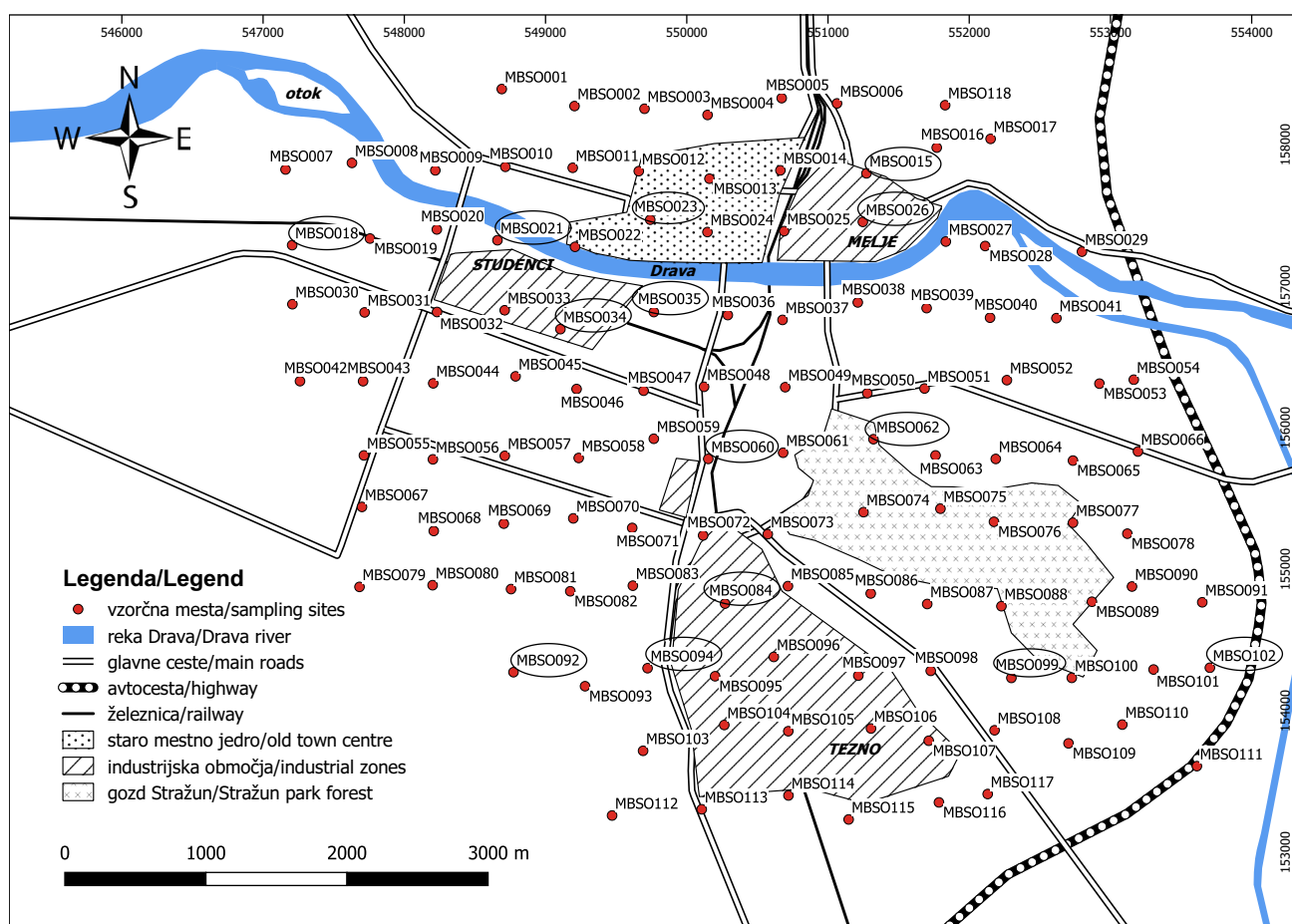
Metode

Vzorčenje in priprava vzorcev

Pri vzorčenju smo sledili priporočilom evropske geokemične ekspertne skupine (Demetriades & Birke, 2015). Vzorčili smo zgornjih 10 cm tal na zatravljenih površinah, kot so zelenice v parkih in ob cestah ter travniki na obrobju mesta. Posamezen vzorec je bil sestavljen iz 4 podvzorcev, ki smo jih odvezli v ogliščih kvadrata velikosti 2×2 m. Skupno smo pridobili 118 vzorcev (Gaberšek & Gosar, 2018). V tem članku obravnavamo le 14 vzorcev, v katerih smo ugotovili visoke celotne vsebnosti nekaterih PSE, predvsem Cu, Pb in Zn: MBSO015, MBSO018, MBSO021, MBSO023, MBSO026, MBSO034, MBSO035, MBSO060, MBSO062, MBSO084, MBSO092, MBSO094, MBSO099 in MBSO102 (sl. 1). Vzorce smo posušili pri 35°C in jih z najlonskimi siti presejali pod 2 mm. Za rentgensko praškovo difrakcijo, ugotavljanje deležev karbonatov in celotnih vsebnosti kemičnih elementov, smo presejane vzorce zmleli s krogličnim ahatnim mlinom. Postopki vzorčenja in priprave vzorcev so podrobneje opisani v Gaberšek & Gosar (2018).

Rentgenska praškova difrakcija

Z rentgensko praškovo difrakcijo smo ugotavljali mineralno sestavo treh vzorcev tal: enega z industrijskega območja Melje (MBSO026), enega z obrobja industrijskega območja Tezno (MBSO084) in enega z obrobja mesta (MBSO092). Analizo rentgenske praškovne difrakcije so izvedli na Naravoslovnotehniški fakulteti, na Oddelku za geologijo. Uporabili so rentgenski difraktometer PHILIPS PW 3710, opremljen s Cu rentgensko cevjo (CuK α sevanje), proporcionalnim števcem in grafitnim monokromatorjem. Sevanje rentgenskih žarkov je bilo generirano pri napetosti 40 kV in toku 20 mA. Snemanje je potekalo v območju $3^\circ \leq 2\theta \leq 70^\circ$, s korakom $0,02^\circ 2\theta$ in hitrostjo 0,4 sekunde na korak. Pridobljene difraktograme smo analizirali s programom X'Pert HighScore Plus 4.6 ter določili minerale s pomočjo podatkovne baze ICSD. Semi-kvantitativno analizo (ugotavljanje deležev posameznih mineralov) smo izvedli s prilagajanjem izmerjenih intenzitet uklonov z referenčnimi intenzitetami posameznega minerala.



Sl. 1. Vzorčna mesta tal na shematski karti Maribora (obkroženi vzorci so bili izbrani za pedološke analize in metodo zaporednih ekstraktij).

Fig. 1. Soil sampling sites on schematic map of Maribor (circled samples were chosen for pedological analyses and sequential extraction procedure).

Pedološke analize

V vseh vzorcih tal smo v laboratorijih Geološkega zavoda Slovenije določili pH vrednosti in na podlagi vsebnosti organskega ogljika ocenili deleže organske snovi. V obravnavanih 14 vzorcih (sl. 1) smo v laboratorijih Centra za pedologijo in varstvo okolja na Biotehniški fakulteti določili deleže karbonatov (CaCO_3), izmenljivega fosforja (P_2O_5) in kalija (K_2O) ter njihovo teksturo.

Za določitev vrednosti pH smo pripravili suspenzijo 10 ml presejanega (< 2 mm) vzorca ter 50 ml 0,01 M CaCl_2 (volumsko razmerje 1:5). Suspenzijo smo najprej ročno mešali 5 min in jo nato pustili mirovati čez noč (ne več kot 24 ur). Pred meritvijo smo suspenzijo ponovno premešali, počakali, da se je stabilizirala in nato izmerili vrednosti s pH metrom (Thermo Scientific Orion Star A329). Merilnik smo predhodno kalibrirali s standardoma z vrednostma pH 4 in 7 (Gaberšek & Gosar, 2018).

Deleže organske snovi v tleh smo ocenili s pomnožitvijo deležev organskega ogljika s faktorjem 1,9. Uporabljeni faktor je predlagal Pribyl (2010), ki je ugotovil, da je za izračun deleža organske snovi na podlagi deleža organskega ogljika bolj primeren faktor 1,9, kot vsesplošno uporabljan faktor 1,724.

Deleže karbonatov v tleh smo določili z volumetrično metodo, ki temelji na reakciji karbonatov s HCl (SIST ISO 10693, 1996). En gram presejanega (< 2 mm) in zmletega vzorca smo prelili z 9 ml 10 % HCl in pri tem s Scheiblerjevim aparatom merili količino nastalega CO_2 (v ml). Ob upoštevanju temperature ($T = 27^\circ\text{C}$) in zračnega pritiska ($P = 0,977 \times 10^5 \text{ N/m}^2$) v laboratoriju, smo z uporabo splošne plinske enačbe izračunali masni delež CaCO_3 v vzorcih tal (Grčman & Zupan, 2008).

Količino izmenljivega oz. rastlinam dostopnega fosforja in kalija smo določili na presejanih (< 2 mm) vzorcih. Zatehtali smo 5 g vzorca in ga prelili s 100 ml AL-ekstrakcijske raztopine (0,1 mol/L amonlaktat in 0,4 mol/L očetna kislina) (Grčman & Zupan, 2008). Suspenzijo smo stresali 2 uri in nato prefiltrirali skozi filtrski papir. Količino fosforja v tleh smo določili spektrofotometrično, kalija pa z atomsko absorpcijsko spektrometrijo (AAS). Rezultate podajamo v mg/100 g tal.

Teksturo tal smo določili z mehansko analizo oz. sedimentacijsko-pipetno metodo z ameriško teksturno klasifikacijo (SIST ISO 11277, 2011).

Ugotavljanje vsebnosti kemičnih elementov

Kemično sestavo tal so analizirali v kanadskem laboratoriju Bureau Veritas Mineral Laboratories. Presejane, zmlate in homogenizirane vzorce (po 15 g) so najprej razklopili z modificirano zlatotopko ($\text{HCl}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O} = 1:1:1$; pri 95°C), nato so izmerili vsebnosti kemičnih elementov z ICP-MS oz. z ICP-ES. Z uporabo analizatorja LECO so določili tudi vsebnosti celotnega (C_{cel}) in organskega ogljika (C_{org}). Izmed 65 analiziranih elementov (Gaberšek & Gosar, 2018; Gaberšek, 2020), se v tem članku posvečamo le 10 PSE v izbranih 14 vzorcih. Kakovost analiz je bila zadovoljiva za vse PSE (Gaberšek & Gosar, 2018).

Metoda zaporednih ekstrakcij

Metoda zaporednih ekstrakcij se uporablja za ugotavljanje porazdelitve izbranih elementov med različnimi talnimi frakcijami (frakcionacija; Tessier et al., 1979). Gre za postopek, pri katerem vzorce tal postopoma izpostavljammo različnim reagentom oz. ekstrakcijskim tekočinam in s tem spreminjamo fizikalno-kemične pogoje v vzorcih, kot so npr. pH in oksidacijsko-redukcijske razmere. Na ta način naj bi v vsakem koraku izločili elemente, ki so vezani na točno določeno talno frakcijo (npr. na karbonate, organsko snov). Reagenti so v vsakem nadaljnjem koraku praviloma močnejši in manj selektivni, kar pomeni, da so PSE, ki se izločijo v začetnih korakih, šibkeje vezani na talne frakcije in so posledično bolj mobilni ter lahko imajo večji vpliv na okolje, kot PSE, ki se izločijo v zadnjih fazah postopka (Bacon & Davidson, 2008). PSE, ki v raztopino pridejo šele z raztapljanjem vzorcev z zlatotopko v VI. stopnji, nastopajo v tleh v kristalnih rešetkah obstojnih primarnih in sekundarnih mineralov, zato ne pričakujemo, da bi prešli v talno raztopino v kratkem časovnem obdobju (Tessier et al., 1979). Metoda zaporednih ekstrakcij ima tudi nekaj pomanjkljivosti, ki jih je treba upoštevati pri interpretaciji rezultatov. Med ekstrakcijami lahko pride do obarjanja sekundarnih mineralov, posamezna ekstrakcija je lahko nepopolna, določeni reagenti lahko raztopijo več različnih talnih frakcij (neselektivnost reagentov), itd. (Bacon & Davidson, 2008). Posledično ne moremo točno določiti koliko nekega elementa je vezanega v določeni talni frakciji oz. mineralu, lahko pa to ocenimo (Bacon & Davidson, 2008).

Uporabili smo nekoliko spremenjeno 6-stopenjsko metodo (Leštan et al., 2003). Izvedli smo jo na vseh 14 vzorcih. Uporabili smo 1 g homogeniziranega, suhega in presejanega (< 2 mm) vzorca. Poleg Cu, Pb in Zn smo analizirali še nasled-

njih 7 elementov: As, Cd, Co, Cr, Mn, Mo in Ni. V nadaljevanju so predstavljene posamezne stopnje uporabljene metode (deloma povzeto po Leštan et al., 2003):

- I. stopnja – frakcija topna v talni raztopini:** v prvi stopnji smo vzorce prelili z 10 ml destilirane vode, stresali 1 h in centrifugirali 30 min na 2300 g. Hitrost stresanja in pogoji centrifugiranja so bili enaki tudi v vseh nadaljnjih korakih. Po končanem centrifugiranju smo bistro tekočino oz. »supernatant« odlili v epruvete in shranili v hladilnik za analize vsebnosti PSE. Na ta način smo pridobili frakcijo, ki je topna v talni raztopini.
- II. stopnja – izmenljivo vezani PSE:** ostanke vzorcev smo dodali 10 ml 1 M raztopine $Mg(NO_3)_2$, stresali 2 h, centrifugirali in prelili tekočino v epruvete ter shranili. Trdni preostanek smo nato »oprli« oz. prelili z 8 ml destilirane vode, stresali 5 min in centrifugirali 30 min na 2300 g. Tekočino smo odlili in zavrgli. V tem koraku smo z reagentom $Mg(NO_3)_2$ nadomestili ione, ki so bili elektrostatično vezani na talne delce. Posledično so ti ioni prešli v raztopino.
- III. stopnja – PSE vezani na karbonate:** frakcijo, ki je vezana na karbonate, smo pridobili tako, da smo trdni preostanek prelili z 10 ml 1 M NH_4OAc (pH 5), stresali 5 h, centrifugirali in shranili tekoči del. S tem smo karbonate v tleh (kalcit, dolomit) raztopili in posledično so PSE, vezani na karbonate, prešli v ekstrakcijsko raztopino. Na koncu smo ponovili enak postopek z destilirano vodo kot v II. stopnji.
- IV. stopnja – PSE vezani na železove in manganove okside:** vzorcem tal smo dodali 20 ml 0,1 M raztopine $NH_2OH \times HCl$ (pH 2), stresali 12 h, centrifugirali in odlili ter shranili bistro tekočino. S tem postopkom smo v vzorcih ustvarili redukcijske pogoje, v katerih so železovi in manganovi oksidi neobstojni, kar je povzročilo prehod obravnavanih PSE vezanih na te okside v raztopino. Po končani ekstrakciji smo trdni preostanek oprali z destilirano vodo po enakem postopku kot v prejšnjih korakih.
- V. stopnja – PSE vezani na organsko snov:** organsko snov smo izpostavili oksidacijskim pogojem tako, da smo trdni preostanek prelili s 3 ml 0,02 M HNO_3 , suspenzijo segrevali v vodni kopeli (85 °C) in pri tem postopoma dodajali 5 ml 30 % H_2O_2 . Vzorce smo pustili v kopeli približno 3 h oz. dokler ni H_2O_2 po-

polnoma izhlapel, občasno smo jih premešali s stekleno palčko. Nato smo dodali 15 ml 1 M raztopine NH_4OAc , stresali 30 min, centrifugirali in shranili tekoči del. To stopnjo smo zaključili z ekstrakcijo z destilirano vodo po enakem postopku kot v prejšnjih korakih.

- VI. stopnja – PSE vezani v preostanku:** v zadnjem koraku smo z zlatotopko raztopili minerale, ki so obstojni v predhodno uporabljenih reagentih (z izjemo nekaterih obstojnejših silikatnih in oksidnih mineralov, ki jih zlatotopka ne raztaplja). Preostanek vzorcev smo prelili z 21 ml 37 % HCl in 7 ml 65 % HNO_3 , pustili stati 16 h pri sobni temperaturi in nato 2 h segrevali na kuhalniku s povratnimi hladilniki. Ohlajene vzorce smo filtrirali v bučke, jih dopolnili do 100 ml z destilirano vodo in shranili (20 ml) v hladilniku do nadaljnjih analiz.

Metodo zaporednih ekstrakcij smo izvedli v laboratorijih Centra za pedologijo in varstvo okolja na Biotehniški fakulteti, vsebnosti 10 elementov v posameznih raztopinah pa so z ICP-MS določili v podjetju Eurofins Erico iz Velenja.

Kakovost metode zaporednih ekstrakcij

Kakovost metode zaporednih ekstrakcij smo spremljali na več načinov: v analizo smo vključili ponovitve 5 vzorcev, 1 slepi vzorec in 1 vzorec standarda BCR no. 701. Ta standard določa standardne vsebnosti za Cd, Cr, Cu, Ni, Pb in Zn. Razvit je bil za 4-stopenjsko BCR metodo zaporednih ekstrakcij (Sutherland, 2010), ki se nekoliko razlikuje od uporabljene metode, tako da smo lahko primerjali le seštevke vseh korakov in ne vsebnosti po posameznih korakih. Z izračunom relativne napake (RE) smo ugotovili, da je bila točnost zadovoljiva za vse elemente (RE med 3,4 in 12,2 %), z izjemo Cd.

Ponovljivost oz. natančnost je bila ustrezna (relativna odstotna razlika oz. RPD < 30 %) v vseh primerih, z izjemo Pb v vzorcu MBSO094 in v nekaterih primerih, ko so bile ugotovljene zelo nizke vsebnosti, ki niso bistveno vplivale na celotne rezultate. Vsebnosti v slepem vzorcu so bile zanemarljive oz. pod mejo določljivosti. Primerjali smo tudi predhodno določene celotne vsebnosti v vzorcih z vsebnostmi ugotovljenimi z metodo zaporednih ekstrakcij. Rezultate smo opredelili kot zadovoljive, če je bil izkoristek med 70 in 130 %, torej če odstopanja med meritvami niso bila višja od 30 %. Ugotovljeni povprečni izkoristki so bili med 84,4 % (Cu) in 106 % (Cr). V primerih Cd in Mo smo z metodo zaporednih ekstrakcij dobili

občutno previsoke vsebnosti (razlika med 300 in 2815 % za Mo in med 123 ter 566 % za Cd), zato smo ta dva elementa izločili iz nadaljnje obravnave. Razlike večje od 30 % smo ugotovili tudi za Cu v vzorcih MBSO084 in MBSO102 ter za Pb in Zn v vzorcu MBSO102, kar je podrobneje opisano v poglavju z rezultati in interpretacijo.

Rezultati in diskusija

Mineralna sestava

V vseh treh analiziranih vzorcih je največ kremenca (37–40 %), sledijo plagioklazi (26–33 %), muskovit/illit (6–18 %), klorit (5–11 %) in dolomit (3–6 %). V vzorcih MBSO026 in MBSO084 so prisotni tudi K-glinenci in nekaj kalcita, v vzorcu MBSO092, ki je bil odvzet na JZ obrobju vzorčnega območja, so prisotni še amfiboli. Mineralna sestava je posledica geogenih dejavnikov oz. prisotnosti magmatskih in metamorfnih kamnin v okolici Maribora ter v porečju reke Drave. Omenjeni minerali so bistveni (kremen, plagioklazi, amfiboli, K-glinenci) in akcesorni (amfiboli, muskovit) minerali v pohorskih magmatskih ter metamorfnih kamninah, ali pa so nastali s preperevanjem omenjenih kamnin (nastanek klorita, illita) (Mioč & Žnidarčič, 1989; Zupančič, 1995). Manjše vsebnosti dolomita in kalcita, katerih vsebnosti so nekoliko višje v obeh vzorcih iz mestnega jedra (po 7 %) kot v vzorcu iz travniške površine na obrobju območja (3 %), lahko izvirajo iz geogenih ali antropogenih virov (npr. zimsko posipanje cest s karbonatnim peskom).

Pedološke lastnosti

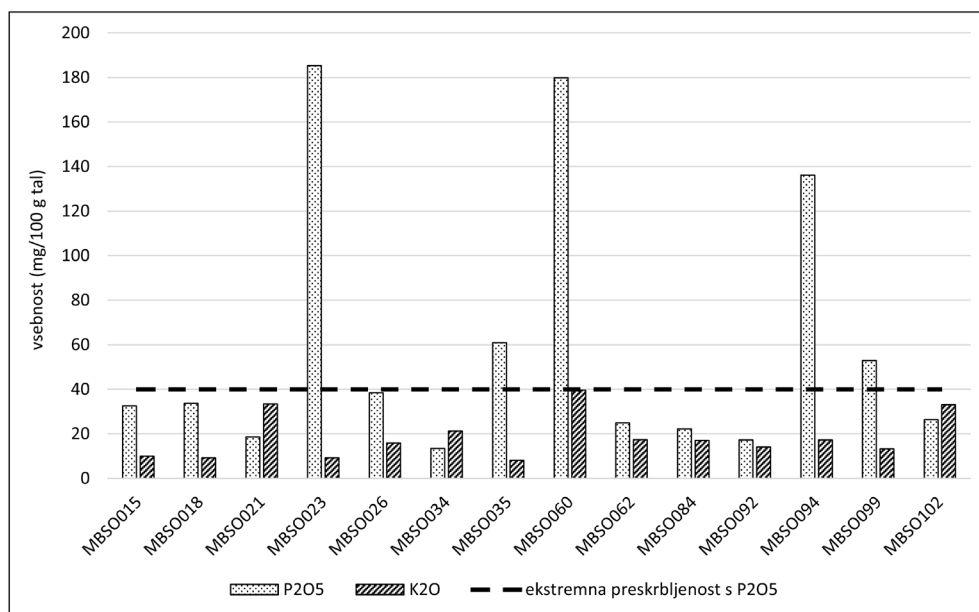
Rezultati pedoloških analiz tal so podani v tabeli 1. Vrednosti pH in deleži celotnega ogljika ter organske snovi v vseh 118 vzorcih mariborskih tal so že bili podrobno opisani (Gaberšek & Gosar, 2018), zato se tu osredotočamo le na izbranih 14 vzorcev. Vrednosti pH v teh vzorcih so precej podobne, saj se gibljejo med 6,9 in 7,4, mediana znaša 7,2. Glede na to, da v Mariboru in okolici prevladujejo nekarbonatne kamnine in sedimenti, so ugotovljene vrednosti nekoliko višje od pričakovanih. Karta pH zgornjega horizonta tal v Sloveniji, ki so jo izdelali na Centru za pedologijo in varstvo okolja na ljubljanski Biotehniški fakulteti (Internet 1) kaže, da so tla v okolici Maribora močno kislja (pH < 4,5; predvsem v Dravski dolini), kislja (4,6–5,5) in zmerno kislja (5,6–6,5). Nevtralna tla (6,6–7,2) so v močno podrejenem položaju, pojavljajo se le na območju Slovenskih Goric. Za tla na urbanih območjih so sicer značilne nevtralne do rahlo ali celo moč-

no bazične vrednosti pH, ne glede na geološko zgradbo ozemlja, kar je posledica antropogenih dejavnosti (Yang & Zhang, 2015). Višje vrednosti pH na območju Maribora glede na okolico lahko deloma pripišemo posipanju cest s karbonatnimi peski in soljenju v zimskem času, saj za te namene v Sloveniji uporabljajo suho sol (NaCl) in mokro sol, kjer je NaCl omočen z raztopino $MgCl_2$ ali $CaCl_2$ (Šeme Lesjak, 2014). Vnašanje (neposredno ali s prašenjem preko ozračja) elektrofiltrskega pepela in gradbenega materiala z nevtralno ali bazično vrednostjo pH (npr. apno, beton) lahko prav tako zviša pH tal v urbanih okoljih (Birke et al., 2011; Yang & Zhang, 2015). V okoljih z višjim pH je običajno večina PSE (npr. Cu, Hg, Pb) nemobilnih oz. manj mobilnih, kot v tleh z nižjim pH (Kabata Pendias, 2011) in posledično predstavljajo manjše tveganje za okolje in ljudi. To je še posebej pomembno za urbana okolja, za katera so značilne visoke vsebnosti nekaterih PSE v tleh in veliko število prebivalcev (Gaberšek & Gosar, 2018).

Vsebnosti celotnega ogljika (C_{cel}) v izbranih vzorcih so med 2,9 % in 8,9 %, vsebnosti organskega ogljika (C_{org}) med 2,1 % in 7,5 %. Mediana C_{cel} je 4,7 % in C_{org} 4,2 %. Od celotne vsebnosti ogljika v tleh, ga povprečno 83 % pripada organskemu ogljiku. Mediana vsebnosti organske snovi je 8,0 %, kar je nekoliko višje v primerjavi s celotnim Mariborom ($Md = 5,9$ %; Gaberšek & Gosar, 2018) in le rahlo nižje od mediane slovenskih tal (8,2 %; Zupan et al., 2008) ter povprečja tal v Ljubljani (9,5 %; Gliha, 2008).

Deleži karbonatov so med 1,2 % in 9,0 %, mediana je 6,1 %. Ti deleži so nižji od vrednosti v ljubljanskih tleh, ki vsebujejo med 10,9 % in 34,5 % karbonatov, povprečje znaša 25 % (Gliha, 2008). To razliko lahko pripišemo geološki zgradbi okolice obeh mest, saj so v zaledju Ljubljane karbonatne kamnine bolj pogoste kot v okolici Maribora.

Vsebnosti rastlinam dostopnega fosforja (P_2O_5 ; sl. 2) so med 13,5 in 185 mg/100 g tal, mediana je 33,1 mg/100 g. Rezultati kažejo, da so tla v Mariboru močno obogatena s P_2O_5 , saj, glede na Mihelič et al. (2010), 36 % vzorcev pripada razredu čezmerne preskrbljenosti (26–40 mg/100 g), 36 % pa razredu ekstremne preskrbljenosti (> 40 mg/100 g). Le 4 vzorce smo lahko opredelili kot dobro preskrbljene s P_2O_5 (13–25 mg/100 g). Če primerjamo vsebnosti rastlinam dostopnega fosforja in celotne vsebnosti fosforja, določene po razklopu z zlatotopko, ugotovimo, da rastlinam dostopni fosfor predstavlja med 19,1 in 77,9 % celotnega fosforja v tleh oz. povprečno 38,5 %.



Sl. 2. Vsebnosti rastlinam dostopnega fosforja (P_2O_5) in kalija (K_2O) (v mg/100 g tal).

Fig. 2. Contents of plant-available phosphorus (P_2O_5) and potassium (K_2O) (in mg/100 g of soil).

Nasplah so za tla urbanih okolij značilne močno povišane vsebnosti fosforja, do kopičenja prihaja predvsem zaradi uporabe organskih gnojil in blata iz čistilnih naprav (Zhang et al., 2001; Yang & Zhang, 2015). Visoke vsebnosti rastlinam dostopnega fosforja v tleh lahko predstavljajo tudi tveganje za onesnaženje podzemne vode (Zhang et al., 2001), predvsem v tleh z majhnimi deleži glin. V mariborskih vzorcih MBSO023 in MBSO060 je ugotovljena vsebnost za 4,5-krat presegala mejno vrednost za ekstremno preskrbljenost tal z rastlinam dostopnim fosforjem. Vzorec MBSO023 je bil odvzet na zelenici v parku v starem mestnem središču, vzorec MBSO060 pa na zelenici pred starejšo večstanovanjsko stavbo na severnem obrobju Tezna. Vzrok visokih vsebnosti P_2O_5 bi lahko predstavljala pretekla raba teh območij, ki sta bili morda namenjeni okrasni parkovni cvetlični gredici (MBSO023) ali vrtu (MBSO060) in zato močno gnojeni. Za slovenske vrtove pogosto velja, da so prekomerno založeni s fosforjem in tudi kalijem, medtem ko so kmetijska tla z manj intenzivno rabo (Šilc, 2008) ter gozdna tla (Urbančič et al., 2005) običajno osiromašena s tema elementoma. Prispevek k visokim vsebnostim na teh dveh in tudi drugih lokacijah bi lahko predstavljalo tudi vnašanje organskih gnojil za vzdrževanje zelenic in prisotnost pasjih iztrebkov. Lokacije z izrazito visokimi vsebnostmi P_2O_5 se pojavljajo tudi na obrobju mesta. Tak primer je lokacija MBSO094 (po vsej verjetnosti gre za zatravljeno njivsko površino), kjer je vsebnost P_2O_5 136 mg/100 g.

Nekoliko drugačna slika se kaže pri vsebnostih rastlinam dostopnega kalija (K_2O ; sl. 2). Vrednosti se gibljejo med 8,1 in 39,6 mg/100 g

tal. Mihelič et al. (2010) so porazdelitev v razrede postavili glede na teksturo tal. V Mariboru tako 3 vrednosti spadajo v razred siromašne preskrbljenosti tal s K_2O (< 10 mg/100 g), 7 v razred srednje preskrbljenosti (10–19 mg/100 g), 1 vzorec kaže dobro preskrbljenost (20–30 mg/100 g) in 3 čezmerno (31–40 mg/100 g). Nekateri najvišje vsebnosti bi lahko pripisali gnojenju mestnih zelenic ali pretekli rabi.

S sedimentacijsko-pipetno metodo smo ugotovili, da največ vzorcev (9) spada v teksturni razred peščene ilovice (PI), 4 vzorci v razred ilovice (I) in 1 v razred meljaste ilovice (MI). Mediana vsebnosti peska znaša 52,8 % in je precej višja od mediane za slovenska tla, ki je v zgornjih 5 cm tal 20,9 % (Zupan et al., 2008). Vsebnosti melja in glin (tabela 1) so nekoliko nižje od slovenskih median, ki sta v zgornjih 5 cm tal 56,8 % za melj in 18,7 % za glino (Zupan et al., 2008). Tudi v okviru raziskovanja tal devetih mariborskih vrtev so bili ugotovljeni podobni teksturni razredi (Grčman et al., 2008). Tovrstna tekstura je lahko odraz antropogenega vnosa materiala v velikosti peska ali geološke sestave okolice Maribora, v kateri prevladujejo siliciklastične kamnine oz. sedimenti, ki so odporni na mehansko in kemično preperavanje.

Vsebnosti kemičnih elementov

V tabeli 2 so podani osnovni statistični podatki o vsebnostih As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb in Zn v izbranih 14 vzorcih. Primerjava z medianami v vseh 118 vzorcih kaže, da imajo izbrani vzorci izrazito višje vsebnosti Cu, Pb in Zn, medtem ko se vsebnosti ostalih elementov bistveno ne razlikujejo. Najvišje vsebnosti omenje-

Tabela 1. Osnovni statistični podatki o pedoloških lastnostih.
Table 1. Descriptive statistics of pedological characteristics.

	N	Min	\bar{x}	Md	Max
C cel. (%)*	118	1,3	3,8	3,6	12,7
C cel. (%)	14	2,9	5,0	4,7	8,9
C org. (%)*	118	1,2	3,3	3,1	11,6
C org. (%)	14	2,1	4,2	4,2	7,5
org. snov (%)*	118	2,3	6,2	5,9	22,0
org. snov (%)	14	4,0	8,0	8,0	14,3
pH*	118	4,7	6,9	7,1	7,5
pH	14	6,9	7,2	7,2	7,4
pesek (%)	14	25,3	52,8	53,8	64,2
grobi melj (%)	14	10,5	14,2	13,7	21,5
fini melj (%)	14	14,4	22,4	22,6	35,6
melj skupno (%)	14	24,9	36,6	36,3	57,1
glina (%)	14	7,5	10,5	8,9	18,1
K₂O (mg/100 g)	14	8,1	18,5	16,5	39,6
P₂O₅ (mg/100g)	14	13,5	60,2	33,1	185
CaCO₃ (%)	14	1,2	5,8	6,1	9,0

*Gaberšek & Gosar (2018); C cel. – delež celotnega ogljika/total carbon content; C org. – delež organskega ogljika/organic carbon content; org. snov – delež organske snovi/organic matter content (C org. (%) × 1,9); N – število analiziranih vzorcev/number of analysed samples; Min – najnižja vrednost/lowest value; \bar{x} – povprečje/mean; Md – mediana/median; Max – najvišja vrednost/highest value

nih treh PSE se pojavljajo razpršeno po celotnem območju. Njihovi najverjetnejši antropogeni viri so industrija, promet in kmetijstvo (Gaberšek & Gosar, 2018). Najvišje vsebnosti Cu smo ugotovili na JV obrobju Maribora, neposredno ob manjšem makadamskem parkirišču ob cesti (MBSO102: 1347 mg/kg) in na industrijskih območjih Melje, v bližini livarne (MBSO026: 525 mg/kg), ter Tezno (MBSO084: 857 mg/kg). Izrazito najvišji vsebnosti Pb smo ugotovili na kmetijski površini na JZ obrobju Maribora (MBSO092: 626 mg/kg) in na industrijskem območju Tezno (MBSO084: 535 mg/kg). Najvišjo vsebnost Zn ima vzorec

MBSO084 s Tezno (1202 mg/kg). Sledijo vzorci z JV obrobja Maribora (MBSO102: 828 mg/kg), vzorčnega mesta severno od Tezno, v bližini Titove ceste (MBSO060: 680 mg/kg) in iz Melja (MBSO026: 628 mg/kg) (Gaberšek & Gosar, 2018). Glede na slovensko Uredbo o mejnih, opozorilnih in kritičnih imisijskih vrednostih nevarnih snovi v tleh (Uradni list RS, št. 68/96 in 41/04 – ZVO-1), vsebnosti Cu, Pb in Zn v večini izmed 14 vzorcev presegajo zakonsko določene vrednosti. Kritične vsebnosti Cu so presežene v treh vzorcih, Pb in Zn pa v po dveh vzorcih. Da bi ugotovili v kakšnih oblikah so ti PSE vezani v tleh in opredelili njihovo mobilnost, smo izvedli metodo zaporednih ekstrakcij.

Porazdelitev PSE med talne frakcije

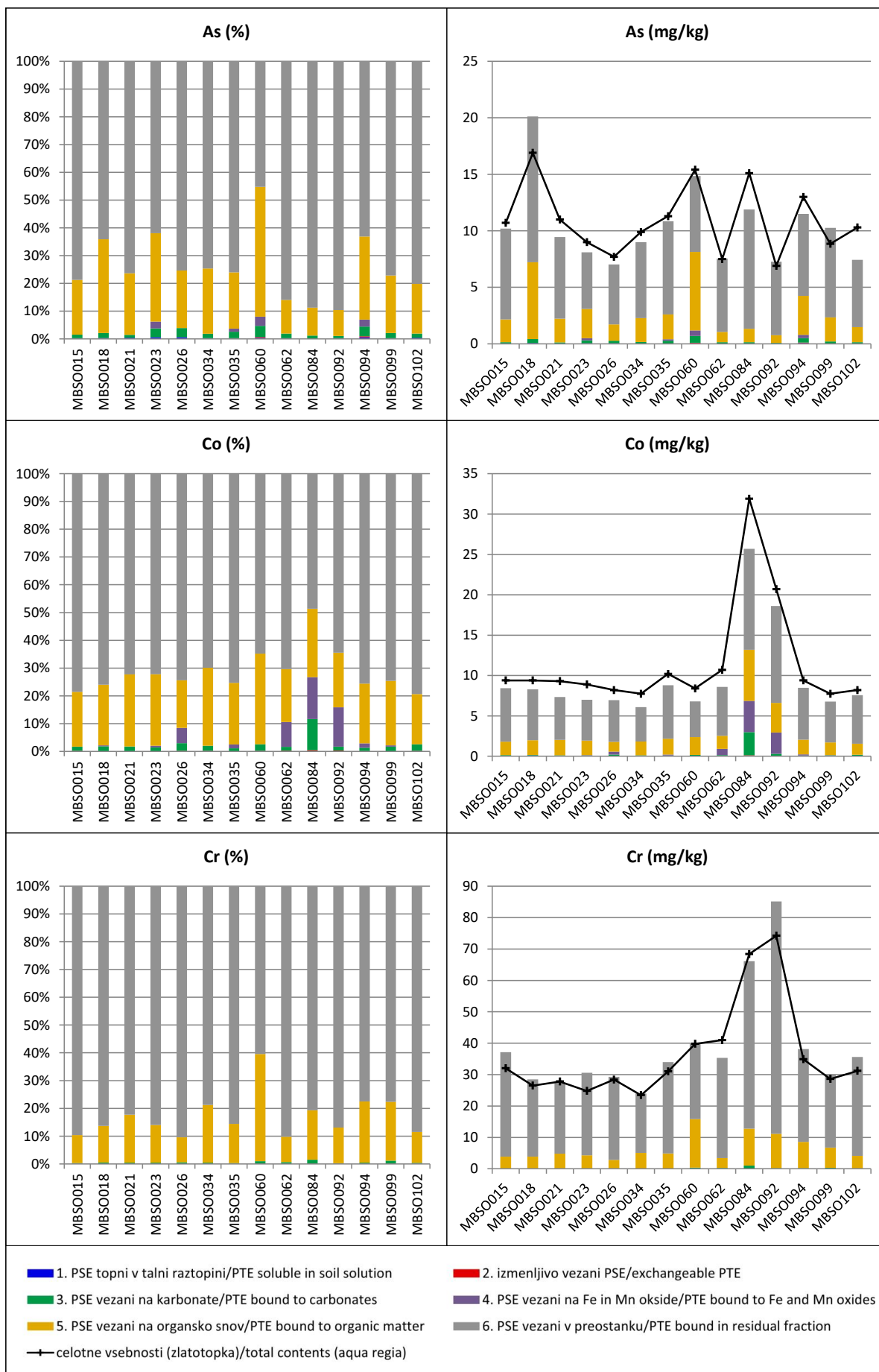
Kakovost metode zaporednih ekstrakcij je bila zadovoljiva za naslednjih 8 PSE: As, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb in Zn (sl. 3-5). V vzorcih MBSO084 in MBSO102, v katerih smo s predhodno analizo po razklopu z zlatotopko ugotovili najvišje celotne vsebnosti Cu (857 in 1347 mg/kg), smo z metodo zaporednih ekstrakcij zaznali občutno nižje vsebnosti. V vzorcu MBSO084 je seštevek vseh 6. stopenj predstavljal 47 % predhodno ugotovljene celotne vsebnosti, v vzorcu MBSO102 pa le slabe 3 %. Oba vzorca sta bila analizirana v dvojniki in v obeh primerih smo dobili enak rezultat. Tudi seštevek vsebnosti Pb in Zn v vzorcu MBSO102 se je močno razlikoval od predhodno ugotovljenih celotnih vsebnosti. Posledično rezultatov metode zaporednih ekstrakcij za Cu v vzorcih MBSO084 in MBSO102 ter za Pb in Zn v vzorcu MBSO102 nismo upoštevali v nadaljnji analizi (so pa vseeno prikazani na slikah 4 in 5). Vzrok za ugotovljene razlike v vsebnostih je lahko morebitna nehomogenost vzorcev.

Prva (frakcija topna v talni raztopini) in 2. stopnja (izmenljivo vezani PSE) metode zaporednih ekstrakcij predstavljata najlažje izmenljive oz. dostopne PSE v tleh. Ugotovljene vsebnosti

Tabela 2. Osnovni statistični podatki o vsebnostih 10 PSE v 14 vzorcih tal in primerjava z medianami v vseh 118 vzorcih.
Table 2. Descriptive statistics of 10 PTE contents in 14 soil samples and comparison with medians of all 118 samples.

	N	As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	Pb	Zn
Min	14	6,9	0,27	7,8	24	42	405	0,44	23	56	96
Md	14	10,9	0,53	9,4	31	151	578	1,12	27	112	260
\bar{x}	14	11,0	0,76	11,4	37	290	571	1,3	31	175	413
Max	14	19,9	2,28	32	74	1347	710	2,78	63	626	1202
Md*	118	10,1	0,32	10,2	31	40	613	0,85	28	44	131

*Gaberšek & Gosar (2018); Min – najnižja vsebnost/lowest content; Md – mediana/median; \bar{x} – povprečna vsebnost/mean; Max – najvišja vsebnost/highest content; N – število analiziranih vzorcev/number of analysed samples



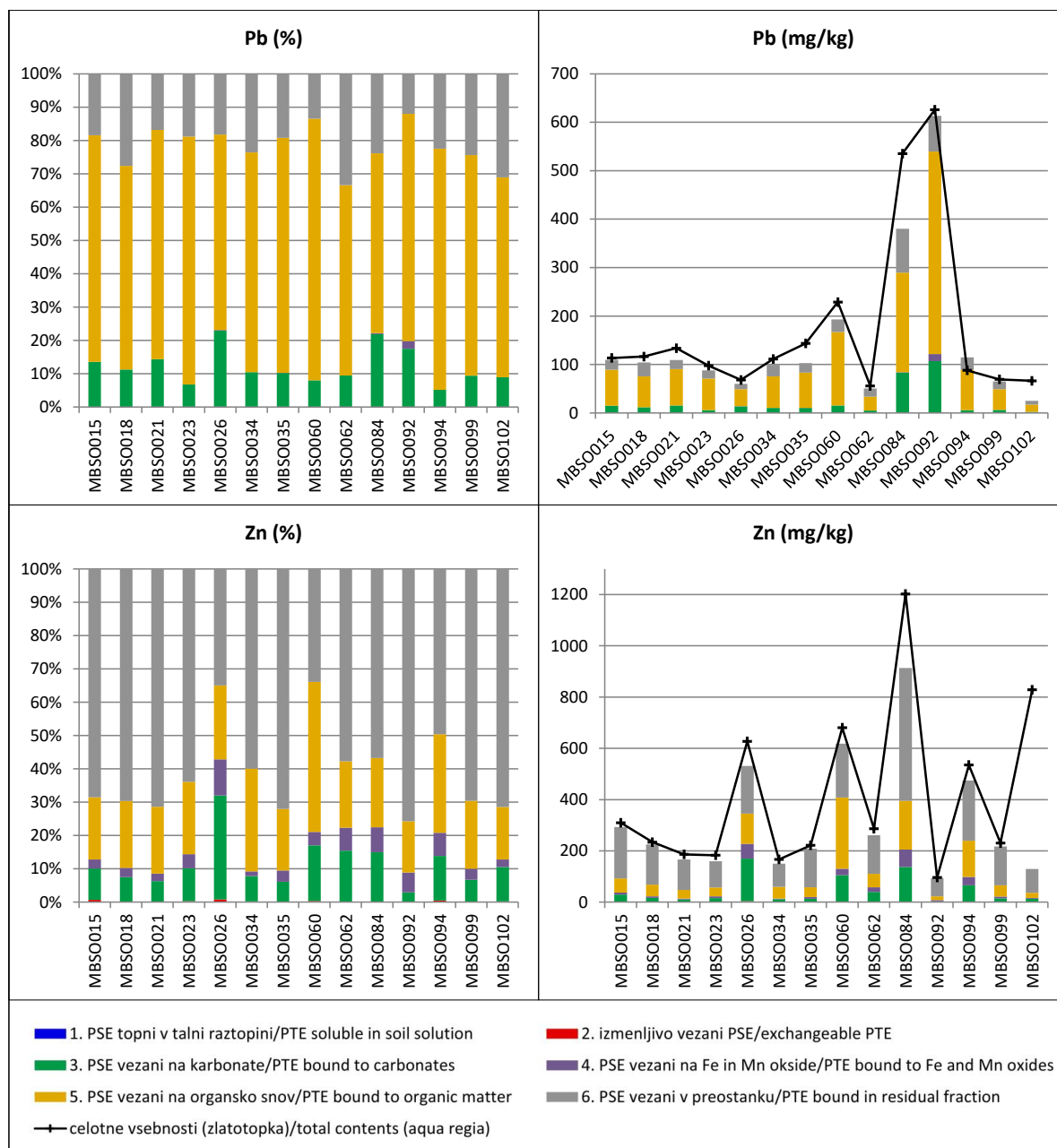
Sl. 3. Frakcionacija As, Co in Cr (v % in mg/kg).

Fig. 3. Fractionation of As, Co and Cr (in % and mg/kg).



Sl. 4. Frakcionacija Cu, Mn in Ni (v % in mg/kg).

Fig. 4. Fractionation of Cu, Mn and Ni (in % and mg/kg).



Sl. 5. Frakcionacija Pb in Zn (v % in mg/kg).

Fig. 5. Fractionation of Pb and Zn (in % and mg/kg).

As, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb in Zn v obeh stopnjah so zelo nizke. Vsebnosti Cr so v vseh vzorcih pod mejo določljivosti ($< 0,005$ mg/kg), povprečni raztopljeni deleži preostalih PSE ne presegajo 0,36 % celotnih vsebnosti v 1. stopnji (As in Cu) oz. 1,3 % v 2. stopnji (Mn). To pomeni, da je večina vsebnosti < 1 mg/kg. Izjema je le Cu v vzorcih MBSO026 (1. stopnja: 1,68 mg/kg in 2. stopnja: 3,85 mg/kg) in MBSO062 (2. stopnja: 1,42 mg/kg) ter izmenljivo vezan Mn (vsebnosti med 3,9 in 22,3 mg/kg, povprečje je 7,3 mg/kg).

Povprečno najmanjši karbonatno vezan (3. stopnja) delež imajo Cr (0,61 % oz. 0,24 mg/kg), As (2,1 % oz. 0,22 mg/kg), Ni (2,4 % oz. 0,76 mg/kg) in Co (2,4 % oz. 0,34 mg/kg) ter največji Zn (11,3 % oz. 48 mg/kg) in Pb (13 % oz. 25 mg/kg).

Povprečni deleži PSE vezanih na Fe in Mn okside/hidrokside oz. PSE vezane na frakcije, ki so neobstoje v redukcijских pogojih (4. stopnja) so večinoma nizki. Za As, Cu, Ni in Pb so nižji od 1 %, za Cr so vsi rezultati pod mejo določljivosti. Nekoliko večji povprečni delež imata Co (3,4 %) in Zn (4,8 %). Izrazito največje deleže vezane v 4. stopnji ima, pričakovano, Mn. Ugotovljeni deleži se gibljejo med 27 in 43 % oz. med 125 in 266 mg/kg.

Za vse PSE, z izjemo Mn, velja, da so v največji meri vezani na organsko snov (5. stopnja) ali na preostanek (6. stopnja). Največja povprečna deleža Cu (50 %) in Pb (66 %) sta vezana na organsko snov, As (74 %), Co (71 %), Cr (83 %), Ni (86 %) in Zn (60 %) pa so v največji meri vezani v preostanku.

V nadaljevanju podajamo podrobnejši opis rezultatov za Cu, Pb in Zn, saj so njihove celotne vsebnosti v obravnavanih vzorcih tal večinoma višje od zakonsko določenih in bi lahko predstavljali tveganje za okolje. Največ **Cu** je vezanega na organsko snov oz. talne frakcije neobstoje v oksidacijskih pogojih (5. stopnja) in v preostanku (6. stopnja). Vsebnosti v 5. stopnji se gibljejo med 7,9 in 235 mg/kg oz. med 20 in 63 % (povprečno 50 %) celotnih vsebnosti, v 6. stopnji pa med 19,7 in 96,2 mg/kg oz. 22 in 76 % (povprečno 43 %) celotnih vsebnosti. Sledi 3. stopnja (PSE vezani na karbonate) z vsebnostmi med 0,4 in 106 mg/kg oz. 0,9 in 24 % (povprečno 5,6 %). Deleži v ostalih treh stopnjah so v vseh vzorcih pod 1 % (sl. 4).

Tudi vsebnosti **Pb** so najvišje v 5. stopnji, nekoliko nižje v 6. in 3. ter zelo nizke v preostalih stopnjah (sl. 5). Vsebnosti v 5. stopnji so med 28,7 in 418 mg/kg oz. predstavljajo med 54 in 79 % (povprečno 66 %) celotnih vsebnosti v tleh. Sledita 6. stopnja, ki predstavlja med 12 in 33 % celotnih vsebnosti Pb v tleh oz. povprečno 21 %, in 3. stopnja s 5,2–23 % (povprečno 12,4 %). Deleži topni v talni raztopini, izmenljivo vezani in vezani na Fe ter Mn okside so pod 0,1 % (vrednosti so pogosto pod mejo določljivosti). Izstopa le vzorec MBSO092, v katerem je na Fe in Mn okside vezanega 2,3 % oz. 14,3 mg/kg celotnega Pb.

Vsebnosti **Zn** so najvišje v preostanku topnem v zlatotopki (sl. 5). Znašajo med 72 in 518 mg/kg oz. med 35 in 76 % (povprečno 60 %) celotnih vsebnosti Zn v tleh. Sledita 5. stopnja s povprečno 23 % (15–45 %) in 3. stopnja s povprečno 11 % (2,8–31 %) celotnih vsebnosti (sliki 3 in 4). Na Fe in Mn okside je povprečno vezanega 4,8 % celotnega Zn oz. med 1,4 in 10,8 %. Deleži Zn topnega v talni raztopini in izmenljivo vezanega so v vseh vzorcih pod 1 %.

Podobno porazdelitev **Pb** in **Zn** med talne frakcije kot v Mariboru, so raziskovalci ugotovili tudi v žerjavskih (Struna, 2008) in celjskih (Leštan et al., 2003) onesnaženih tleh. V Celju je enako kot v Mariboru največ Pb vezanega na organsko snov (35,8–71,1 %), v preostanku (10,4–53,4 %) in na karbonatih (2,04–43,5 %), enako velja tudi za Zn (Leštan et al., 2003). Podobno je tudi v tleh iz Žerjava največ Pb in Zn vezanega na organsko snov (4,4–76,4 % in 19,8–62,4 %), karbonate (18,1–73 % in 10,7–48,2 %) ter v preostanku (3,8–65,5 % in 5,2 %–45,4 %) (Struna, 2008). Za tla vseh treh slovenskih mest so značilne nizke vsebnosti oz. deleži Pb in Zn v 1. ter 2. stopnji, ki opredeljuje ta najlažje izmenljive oz. dostopne PSE in veliki razponi v deležih v posameznih stopnjah med različnimi vzorci. V primerjavi z Mariborom, so

v celjskih in žerjavskih tleh večji deleži Pb in Zn vezani na karbonate. To je posledica razlik v geoloških zgradbah, saj v okolici Maribora, za razliko od Celja in Žerjava, prevladujejo magmatske, metamorfne in siliciklastične kamnine.

Morebitne povezave med frakcionacijo PSE in pedološkimi lastnostmi smo ugotavljali z izračunom neparometričnih Spearmanovih korelacijskih koeficientov. Statistično značilnih korelacij, s katerimi bi lahko pojasnili rezultate metode zaporednih ekstrakcij, v večini primerov nismo odkrili. Izjema so le statistično značilne korelacije (0,5–0,9) med deleži melja in vsebnostmi naslednjih PSE: Co v 5. in 6. stopnji; Pb v 5. stopnji; Cr, Mn ter Ni v 6. stopnji; celotne vsebnosti Co, Cr, Mn in Ni. Primerjali smo tudi izstopajoče rezultate metode zaporednih ekstrakcij v posameznih vzorcih s pedološkimi lastnostmi istega vzorca. Tudi v teh primerih nam frakcionacije ni uspelo zadovoljivo pojasniti z analiziranimi pedološkimi lastnostmi.

Kot smo omenili že v poglavju o uporabljenih metodah, ima metoda zaporednih ekstrakcij določene pomanjkljivosti oz. ne daje povsem zanesljivih rezultatov, saj med ekstrakcijami lahko pride do obarjanja sekundarnih mineralov, posamezna ekstrakcija je lahko nepopolna, določeni reagenti lahko raztopijo več različnih talnih frakcij (neselektivnost reagentov), itd. (Bacon & Davidson, 2008). Gliha (2008) je na primer s primerjavo modificirane Tessierjeve metode in standardizirane BCR metode (4-stopenjska metoda, ki temelji na Tessierjevi) ugotovila določene razlike v porazdelitvi Pb, predvsem v deležih vezanih na karbonate, organsko snov in Fe ter Mn okside. Razlike je pripisala dejstvu, da se pri Tessierjevi metodi karbonati v 3. stopnji niso popolnoma raztopili in so se raztapljali še v nadaljnjih stopnjah ter posledično zviševali pH, kar je vplivalo na manjše izločanje PSE iz Fe ter Mn oksidov. To so potrdili z meritvijo pH vrednosti raztopin pred začetkom in po koncu vsake stopnje (Gliha, 2008).

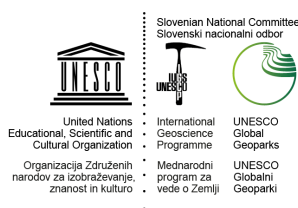
Kljub morebitnim pomanjkljivostim metode zaporednih ekstrakcij, pridobljeni rezultati omogočajo vsaj delno oceno o tem kako močno so obravnavani PSE vezani v oz. na različne talne frakcije. Vsi PSE, z izjemo Mn, so v največji meri vezani na organsko snov (5. stopnja) in preostanek (6. stopnja), kar kaže na njihovo relativno močno vezavo. Še posebej močno vezani so As, Co, Cr in Ni. V 1. in 2. stopnji, ki predstavljata najlažje izmenljive PSE, so ugotovljene vsebnosti praktično zanemarljive. Ti rezultati kažejo, da vsebnosti obravnavanih PSE v mariborskih tleh ne predstavljajo tveganja za okolje.

Zaključek

Tla v urbanih okoljih se zaradi antropogenih vplivov običajno izrazito razlikujejo od ostalih tal. Rezultati naše raziskave kažejo, da to velja tudi za tla v Mariboru. Izmed preučevanih pedoloških lastnosti, antropogen vpliv najbolj jasno odraža ugotovljena pH vrednost okrog 7, kar je višje od tal okoliških neurbanih območij, in visoke vsebnosti rastlinam dostopnega fosforja. Tekstura in mineralna sestava sta v največji meri posledica geogenih dejavnikov. Vsebnosti in prostorska porazdelitev nekaterih PSE v tleh kaže na njihov delno antropogen izvor. Najbolj izrazito to velja za Cu, Pb in Zn, katerih najvišje vsebnosti presegajo zakonodajno določene meje za vsebnosti v tleh. Z metodo zaporednih ekstrakcij smo ugotovili, da so vsi preučevani PSE (As, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb in Zn) relativno močno vezani na talne komponente in zato predvidevamo, da pri trenutnih fizikalno-kemičnih razmerah v tleh ne predstavljajo tveganja za okolje.

Zahvala

Raziskave smo izvedli v okviru programa usposabljanja mladih raziskovalcev, raziskovalnega programa »Podzemne vode in geokemija« (P1-0020) ter raziskovalnega projekta »Dinamika in snovni tok potencialno strupenih elementov (PSE) v urbanem okolju« (J1-1713), ki jih financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS). Finančno pomoč je nudila tudi Slovenska nacionalna komisija za UNESCO, Nacionalni odbor Mednarodnega programa za geoznanost in geoparke.



Literatura

- Bacon, J.R. & Davidson, C.M. 2008: Is there a future for sequential chemical extraction? *Analyst*, 133: 25–46. <https://doi.org/10.1039/B711896A>
- Birke, M., Rauch, U. & Stummeyer, J. 2011: Urban geochemistry of Berlin, Germany. In: Johnson, C.C., Demetriades, A., Locutura, J., Ottesen, R.T. (eds.): *Mapping the Chemical Environment of Urban Areas*. Wiley-Blackwell, John Wiley & Sons, Chichester, U.K.: 245–268.
- Craul, J. P. 1985: A description of urban soils and their desired characteristics. *Journal of Arboriculture*, 11: 330–339.
- Demetriades, A. & Birke, M. 2015: *Urban Geochemical Mapping Manual: Sampling, Sample Preparation, Laboratory Analysis, Quality Control Check, Statistical Processing and Map Plotting*. EuroGeoSurveys, Belgium: 166 str. http://www.eurogeosurveys.org/wp-content/uploads/2015/10/Urban_Geochemical_Mapping_Manual.pdf
- Gaberšek, M. 2020: Celostna obravnava geokemije trdnih anorganskih delcev v urbanem okolju. Doktorska disertacija. Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, Ljubljana: 215 str.
- Gaberšek, M. & Gosar, M. 2018: Geochemistry of urban soil in the industrial town of Maribor, Slovenia. *Journal of Geochemical Exploration*, 187: 141–154. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.06.001>
- Gliha, S. 2008: Vpliv vsebnosti karbonatov v tleh na uspešnost standardizirane BCR sekvenčne ekstrakcije. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 36 str.
- Grčman, H. & Zupan, M. 2008: Navodila za vaje iz pedologije 2008/2009. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo, Ljubljana: 46 str.
- Grčman, H., Zupan, M. & Tič, I. 2008: Ugotavljanje kakovosti tal v Mestni občini Maribor: končno poročilo. Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo, Center za pedologijo in varstvo okolja, Ljubljana: 45 str.
- Hazelton, P. & Murphy, B. 2011: *Understanding soils in urban environments*. CSIRO, Collingwood, Earthscan, London: 148 str.
- Howard, J.L. & Orlicki, K.M. 2016: Composition, micromorphology and distribution of microartifacts in anthropogenic soils, Detroit, Michigan, USA. *CATENA* 138: 103–116. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.11.016>
- Impellitteri, C.A., Allen, H.E., Yin, Y., You, S.J. & Saxe, J.K. 2001: Soil properties controlling metal partitioning. In: Selim, M. & Sparks, D. L. (eds.): *Heavy metal release in soils*. Lewis publishers, ZDA: 149–165.
- Kabata Pendias, A. 2011: *Trace elements in soils and plants*, fourth edition. Taylor and Francis Group, ZDA: 534 str.
- Lal, R. 1993: Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality and sustainability. *Soil & Tillage Research*, 27: 1–8. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(93\)90059-X](https://doi.org/10.1016/0167-1987(93)90059-X)

- Lehmann, A. & Stahr, K. 2007: Nature and significance of anthropogenic urban soils. *Journal of Soils and Sediments*, 7/4: 247–260. <https://doi.org/10.1065/jss2007.06.235>
- Leštan, D., Grčman, H., Zupan, M. & Bačac, N. 2003: Relationship of Soil Properties to Fractionation of Pb and Zn in Soil and Their Uptake into *Plantago lanceolata*. *Soil and Sediment Contamination*, 12/4: 507–522. <https://doi.org/10.1080/713610986>
- Mihelič, R., Čop, J., Jakše, M., Štampar, F., Majer, D., Tojnko, S. & Vrščič, S. 2010: Smernice za strokovno utemeljeno gnojenje. Republika Slovenija, Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano, Ljubljana: 28–29. <https://www.program-podezelja.si/sl/knjiznica/26-smernice-za-strokovno-utemeljeno-gnojenje/file> (dostop 3. 2. 2020)
- Mioč, P. & Žnidarčič, M. 1989: Osnovna geološka karta 1:100.000. Tolmač za lista Maribor in Leibnitz. Zvezni geološki zavod, Beograd: 60 str.
- Pribyl, D.W. 2010: A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma*, 156: 75–83. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.02.003>
- Rieuwerts, J.S., Thornton, I., Farago, M.E. & Ashmore, M.R. 1998: Factors influencing metal bioavailability in soils: preliminary investigations for the development of a critical loads approach for metals. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 10/2: 61–75. <https://doi.org/10.3184/095422998782775835>
- SIST ISO 10693. 1996: Kakovost tal - Določevanje karbonatov - Volumetrijska metoda: 7 str.
- SIST ISO 11277. 2011: Kakovost tal - Določevanje porazdelitve velikosti delcev v mineralnem delu tal - Metoda s sejanjem in usedanjem: 34 str.
- Struna, T. 2008: Frakcionacija svinca in cinka ter vsebnost glomalina v tleh iz Žerjava. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 34 str.
- Sutherland, R.A. 2010: BCR-701: A review of 10-years of sequential extraction analyses. *Analytica Chimica Acta*, 680: 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2010.09.016>
- Šeme Lesjak, Š. 2014: Zimsko vzdrževanje državnih cest. Diplomsko delo višješolskega strokovnega študija. B&B Višja strokovna šola, Ljubljana: 46 str. https://www.bb.si/doc/diplome/Seme_Lesjak_Spela.pdf (dostop 20. 5. 2020)
- Šilc, I. 2008: Založenost tal s fosforjem in kalijem na območju občine Ribnice. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 29 str.
- Tack, F.M.G. 2010: Trace elements: General Soil Chemistry, Principles and Processes. V: Hooda, P. S. (ur.): Trace elements in soils. Wiley, VB: 9–37.
- Tessier, A., Campbell, P.G.C. & Bisson, M. 1979: Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals. *Analytical Chemistry*, 51/5: 844–851. <https://doi.org/10.1021/ac50043a017>
- Uradni list RS, št. 68/96 in 41/04 – ZVO-1: Uredba o mejnih, opozorilnih in kritičnih imisijskih vrednostih nevarnih snovi v tleh.
- Urbančič, M., Simončič, P., Prus, T. & Kutnar, L. 2005: Atlas gozdnih tal Slovenije. Zveza gozdarskih društev Slovenije, Gozdarski vestnik in Gozdarski inštitut Slovenije: 100 str. http://www.gozdis.si/data/publikacije/1_Atlas_gozdih_tal.pdf (dostop 3. 5. 2020)
- Vidic, N.J., Prus, T., Grčman, H., Zupan, M., Lisec, A., Kralj, T., Vrščaj, B., Ruprecht, J., Šporar, M., Suhadolc, R., Mihelič, R. & Lobnik, F. 2015: Tla Slovenije s pedološko karto v merilu 1:250.000 = Soils of Slovenia with soil map 1:250.000. Evropska komisija, Skupni raziskovalni center (JRC): 17–20. (http://soil.bf.uni-lj.si/projekti/pdf/atlas_final_2015.pdf, 17. 2. 2020)
- Vrščaj, B., Repe, B. & Simončič, P. 2017: The soils of Slovenia. *World Soils Book Series*. Springer: 171–198.
- Werkenthin, M., Kluge, B. & Wessolek, G. 2014: Metals in European roadside soils and soil solution - A review. *Environmental Pollution* 189: 98–110. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.02.025>
- Wong, C.S.C., Li, X. & Thornton, I. 2006: Urban environmental geochemistry of trace metals. *Environmental Pollution*, 142/1: 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.09.004>
- Yang, J.L. & Zhang, G.L. 2015: Formation, characteristics and eco-environmental implications of urban soils – A review. *Soil Science and Plant Nutrition*, 61: 30–46. <https://doi.org/10.1080/00380768.2015.1035622>
- Zhang, G.L., Burghardt, W., Lu, Y. & Gong, Z.T. 2001: Phosphorus-enriched soils of urban and suburban Nanjing and their effect on groundwater phosphorus. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 164/3: 295–301. [https://doi.org/10.1002/1522-2624\(200106\)164:3<295::AID-JPL-N295>3.0.CO;2-T](https://doi.org/10.1002/1522-2624(200106)164:3<295::AID-JPL-N295>3.0.CO;2-T)

- Zupan, M., Grčman, H. & Lobnik, F. 2008: Raziskave onesnaženosti tal Slovenije. Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana. [http://www.arso.gov.si/varstvo%20okolja/tla/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/Publikacija%20Raziskave%20onesna%C5%BEenosti%20tal%20Slovenije%20\(1989-2007\).pdf](http://www.arso.gov.si/varstvo%20okolja/tla/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/Publikacija%20Raziskave%20onesna%C5%BEenosti%20tal%20Slovenije%20(1989-2007).pdf)
- Zupančič, N. 1995: Minerali pohorskega magmatskega masiva = Minerals from the Pohorje igneous massif. *Geologija*, 37/38: 271–303. <https://doi.org/10.5474/geologija.1995.011>
- Internet sources:
Internet 1: http://www.bf.uni-lj.si/fileadmin/groups/2701/tematskakarta_pH1.pdf (dostop 3. 2. 2020)



Sledilni poskus na odlagališču komunalnih odpadkov Dragonja

Tracer test on the Dragonja landfill

Barbara ČENČUR CURK

Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Aškerčeva cesta 12, SI-1000 Ljubljana,
barbara.cencur@geo.ntf.uni-lj.si

Prejeto / Received 13. 1. 2020; Sprejeto / Accepted 5. 11. 2020; Objavljeno na spletu / Published online 7. 12. 2020

Ključne besede: odlagališče, podzemna voda, sledilni poskus, Dragonja

Key words: landfill, groundwater, tracer test, Dragonja

Izvleček

V prispevku so podani rezultati sledilnega poskusa s sledilom uranin na odlagališču nenevarnih odpadkov Dragonja. Namen sledilnega poskusa je bil ugotoviti, kakšna je dinamika prenosa onesnaževal iz odlagališča v podzemno vodo. Odlagališče odpadkov leži na debelejši preperini flišnih kamnin, ki gradijo pobočje hriba. Ob vznožju so meljno-glinasti in delno peščeni aluvialni sedimenti reke Dragonja. Prenos uranina je odvisen od intenzitete in trajanja padavin, potencialne evapotranspiracije, prepustnosti sedimentov, infiltracije padavin v odlagališče odpadkov in zasičenosti flišne preperine. Uranin se je najprej pojavil v vrtini P2, ki je dolvodno od mesta injiciranja v smeri toka vode po preperini. Vrtina P1 ni v smeri direktnega toka in se zato pojavi le rob dispergirane oblaka sledila. Podzemna voda iz flišne preperine se izliva v aluvialno ravnico, koncentracije uranina pa se razredčijo v podzemni vodi. Zaradi tega je v vrtini P5 zaznan počasen dvig in upad koncentracije uranina. Nivoji podzemne vode so zaradi velike evapotranspiracije kljub padavinam upadali vse do jesenskega deževja v oktobru. Sledilni poskus je potrdil heterogenost in kompleksnost geološke zgradbe območja odlagališča.

Abstract

The paper presents the results of a tracer experiment with the uranine tracer at the non-hazardous landfill of Dragonja. The purpose of the tracer test was to determine the dynamics of the potential pollutants from the landfill to the groundwater. The landfill lies on the thicker weathered layer of flysch rock that forms the slope of the hill. At the foot of the hill are silty clay and partly sandy alluvial sediments of the Dragonja River. The transport of uranine depends on the intensity and duration of precipitation, potential evapotranspiration, permeability, precipitation infiltration into the landfill, and saturation of the weathering layer of flysch. Uranine first appeared in the observation well P2, which is located downstream of the injection point, in the direction of water flow. Observation well P1 is not in the direction of direct flow and therefore only the edge of the dispersed tracer plume appeared in P1. The groundwater from the flysch weathered layer drains into the alluvial plain and the uranine concentrations are diluted in the groundwater. In the observation well P5 a slow increase and decrease of the uranium concentration was therefore observed. Due to the high evapotranspiration, the groundwater levels were falling until October, when they began to rise after autumnal precipitation events. The tracer experiment confirmed the heterogeneity and complexity of the geological structure of the landfill site.

Uvod

Odlagališča nenevarnih oziroma nevarnih odpadkov so z začetkom industrijske dobe pa vse do danes postala nuja, saj zbiranje in odlaganje odpadnega materiala na centraliziranih območjih prispeva k zmanjševanju nevarnosti za javno zdravje in varnost (Mor et al., 2006).

V splošnem so stara odlagališča odpadkov nastajala v vrtačah (kras), grapah ali v opuščeni dnevni kopih (na aluvialnih ravninah tudi v gramoznicah), ki so jih zapolnili z odpadki, nato pa odpadke enostavno prekrili s prekrivko in zatravili. V večini primerov so odpadke

odlagali neposredno na spodaj ležeča tla brez tesnjenja ali neprepustne podlage, ki bi preprečila izcednim vodam odtekanje iz odlagališča v podzemno vodo. V 90-ih letih prejšnjega stoletja pa so se zaradi sprejetja stroge zakonodaje odlagališča odpadkov tudi v Sloveniji spremenila v natančno planirana, moderna in tesnjena odlagališča s tehnološkimi sistemi (zbirni centri, mehanska biološka obdelava, sistem izcednih vod, sežig plina). Zakonodaja (Uradni list RS, št. 49/06, 114/09, NPB1 in 53/15; Uradni list RS, št. 10/2014, 54/2015, 36/2016 in 37/2018) s področja odpadkov odlagališčem predpisuje monitoring

okolja v času obratovanja odlagališča ter tudi za obdobje po zaprtju (za zaprto odlagališče za nevarne odpadke ali zaprto odlagališče za nenevarne odpadke najmanj 30 let, za zaprto odlagališče za inertne odpadke pa najmanj 10 let). Prispevek se osredotoča na monitoring podzemne vode. Za izvajanje monitoringa podzemne vode so potrebne vsaj tri opazovalne vrtime, in sicer najmanj eno gorvodno in dve dolvodno glede na prevladujočo smer toka podzemne vode. V kraško-razpoklinskih vodonosnikih pa so lahko opazovalna mesta tudi izviri. Lokacije opazovalnih mest so določene v hidrogeološki študiji za posamezno odlagališče odpadkov, ki je hidrogeološki del programa obratovalnega monitoringa podzemnih vod. Vendar pa vsa odlagališča nimajo vzpostavljenega optimalnega monitoringa podzemne vode, saj pogosto gorvodnega opazovalnega mesta ni, kot je to tudi v primeru odlagališča Dragonja. Poleg tega so starejša odlagališča odpadkov zelo kompleksna, tako z vidika geološke sestave pod odlagališčem, kot tudi z vidika tehnologije, saj so večinoma najstarejši deli netesnjeni, sledijo novejši deli z delnim tesnjenjem ter najnovejši deli z vsemi tesnilnimi plastmi, kot zahteva zakonodaja. Zaradi navedenega je zato lahko kompleksna tudi sama izvedba hidrogeološkega monitoringa (Ratej & Brenčič, 2005; Prestor & Janža, 2002). odlagališča kot vira onesnaževanja podzemne vode je možna v primeru, da poznamo hidrogeološke značilnosti raziskovanega območja. Sledilni poskusi so se v preteklosti že večkrat uporabljali za določanje vpliva odlagališča na podzemno vodo (Salama et al., 1989; Woodman et al. 2017), vendar je potrebna previdnost pri izbiri sledila, saj lahko organske snovi iz izcedne vode vplivajo na detekcijo fluorescenčnih sledil (Smart, 1985; Ma-

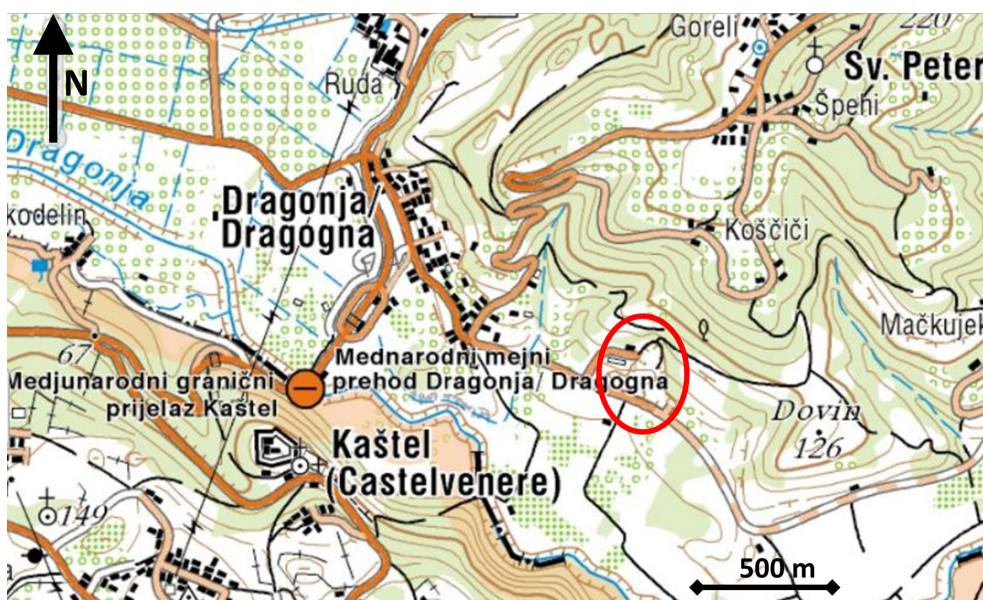
rius et al. 2010). Sledilni poskusi se uporabljajo tudi za določanje transporta onesnaževal znotraj odlagališča v eksperimentalnih kolonah (Rosqvist & Bendz, 1999; Hudson, 2007; Woodman et al., 2015) ali na terenu (Jolly et al., 2011; Caicedo, 2013; Woodman et al., 2014).

Večina sledilnih poskusov v Sloveniji je bila izvedena v kraško-razpoklinskih vodonosnikih z namenom določiti smeri in značilnosti toka podzemne vode za določitev vpliva odlagališča ter za določitev učinkovitega programa monitoringa kemijskega in količinskega stanja podzemne vode (Čenčur Curk et al., 2007). Sledilni poskusi so bili tako izvedeni za odlagališča Mala gora pri Ribnici (Kogovšek & Petrič, 2006), Sežana (Kogovšek & Petrič, 2007) in Mozelj (Kogovšek & Petrič, 2010).

V prispevku je predstavljen sledilni poskus na odlagališču nenevarnih odpadkov Dragonja, ki je bil izveden z namenom ugotoviti vpliv odlagališča na podzemno vodo ter dinamiko transporta snovi (onesnaževal) iz odlagališča v podzemno vodo glede na hidrogeološke in padavinske razmere.

Odlagališče nenevarnih odpadkov Dragonja

Odlagališče nenevarnih (komunalnih) odpadkov leži na obrobju doline reke Dragonje in sicer na njenem desnem bregu (sl. 1). Od vasi Dragonja je oddaljeno približno 600 metrov. Odlagališče leži na pobočju hriba, ki se spušča v smeri proti jugovzhodu. Večji del okolice odlagališča je gozdnat, le del terena tik ob severozahodu odlagališča predstavljajo terasasto urejene njive. Severno od odlagališča se začne izrazita grapa, ki na zahodni strani odlagališča zavije proti jugu in se konča na ravnici. Na južni strani odlagališča se razprostira ravnica, na kateri so sadovnjaki in njive (sl. 1).



Sl.1. Lokacija odlagališča odpadkov Dragonja (Internet 1).

Fig. 1. Location of the Dragonja landfill (Internet 1).

Odlagališče Dragonja obratuje vse od leta 1964 in obsega stari in novi del. Stari del odlagališča nima ustreznega tesnenja in je na vzhodnem delu odlagališča na flišni podlagi. Deloma so bili urejeni sistemi za odvajanje izcednih in padavinskih vod ter odplinjevalni jaški. Leta 1992 so delno sanirali stari del odlagališča. Izcedne vode so tako speljali v rastlinsko čistilno napravo in pričeli kompaktirati odpadke. V letu 1995 so na zahodnem delu zgradili novi del odlagališča in uredili zbirni center. Dno novega dela odlagališča je tesnjeno z geobentom in PEHD folijo. Urejen je sistem za zbiranje in odvajanje izcednih ter zalednih padavinskih vod. Postavljeni so tudi odplinjevalni jaški z odvajanjem odlagalniškega plina in sežigom na bakli (Ivanuša-Šket et al., 2015). Stari in novi del odlagalnega polja se naslanjata drug na drugega in v naravi nista ločena (Ivanuša-Šket et al., 2017). Leta 2011 so prenehali odlagati odpadke, zato je odlagališče v fazi zapiranja.

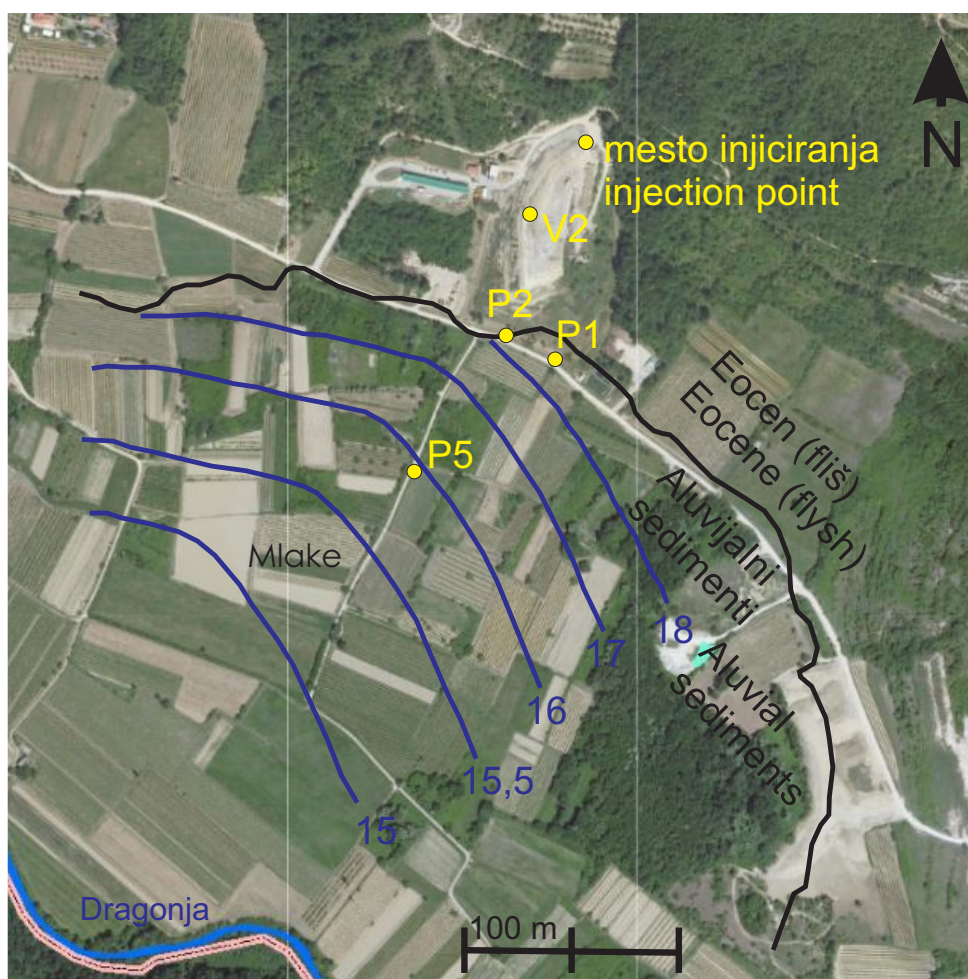
Hidrogeološke značilnosti

Odlagališče leži na eocenskih flišnih kamninah (sl. 2), oziroma na preperini flišnih kamnin. Pobočja gričev namreč prekriva debela plast he-

terogene preperine, katero sestavljajo peščene, glinene in meljne komponente. Na območju odlagališča je ocenjena debelina preperine 7,8 metra (Rogelj, 1992). V dolini Dragonje so aluvialni sedimenti doline reke Dragonje (sl. 2).

Za potrebe monitoringa podzemne vode je bilo leta v okviru hidrogeoloških raziskav izdelanih sedem vrtin in vse so bile opremljene kot piezometri. V času izvajanja sledilnega poskusa so bile v uporabi le tri vrtine in sicer P1, P2 in P5 (sl. 2), ostale pa so bile poškodovane in uničene iz različnih razlogov (med njimi tudi vrtina V2, ki je na sredini odlagalnega polja).

Vrtini P1 in P2 se nahajata med odlagališčem in cesto. Vrtina P1 se nahaja na vznožju starega dela odlagališča, to je med odlagališčem in cesto. Vrtina P2 pa se nahaja na vznožju novega dela. V obeh vrtinah se gladina vode spreminja glede na hidrološke razmere. Globina podzemne vode je od enega do štiri metre pod površjem. Za vrtino P1 ni podatkov o cevitvi, a je verjetno filtrna cev po celotni dolžini, tako kot je v vrtinah P2 in P5 (razen usedalnika na dnu vrtine). Premer vrtin P2 in P5 je 50 mm. Vrtina P5 je od novega dela odlagališča oddaljen približno 70 metrov proti jugu. Nahaja se sredi polja ob dovozni poti in ima



Sl. 2. Ortofoto posnetek (2011; ARSO 2019) odlagališča odpadkov Dragonja z označenimi vzorčevalnimi mesti (P1, P2 in P5), mestom injiciranja, hidroizohipsami (povzeto po Rogelj, 1992 in Ivanuša-Šket et al., 2017) in mejo med Eocenskim flišem ter aluvialnimi sedimenti (Ivanuša-Šket et al., 2015).

Fig. 2. Areal photo (2011; ARSO 2019) of the Dragonja landfill with locations of the tracer injection point, observation wells (P1, P2 and P5), groundwater level contours (after Rogelj, 1992 and Ivanuša-Šket et al., 2017) and border between Eocene flysh rocks and aluvial sediments (Ivanuša-Šket et al., 2015).

poškodovano ustje. Globina do podzemne vode je od enega do dva metra (Jerebica, 2009). Tabela 1 prikazuje razpone nivojev podzemne vode v obdobju 2005 – 2015 (Ivanuša-Šket et al., 2015).

Tabela 1. Razpon nivojev podzemne vode (v m n.v.) v obdobju 2005 – 2015 (Ivanuša-Šket et al., 2015) ter v obdobju vzorčenja za sledilni poskus (Jerebica, 2009).

Table 1. Range of groundwater levels (in m a.s.l.) in the period 2005 – 2015 (Ivanuša-Šket et al., 2015) and in the sampling period of the tracer test (Jerebica, 2009).

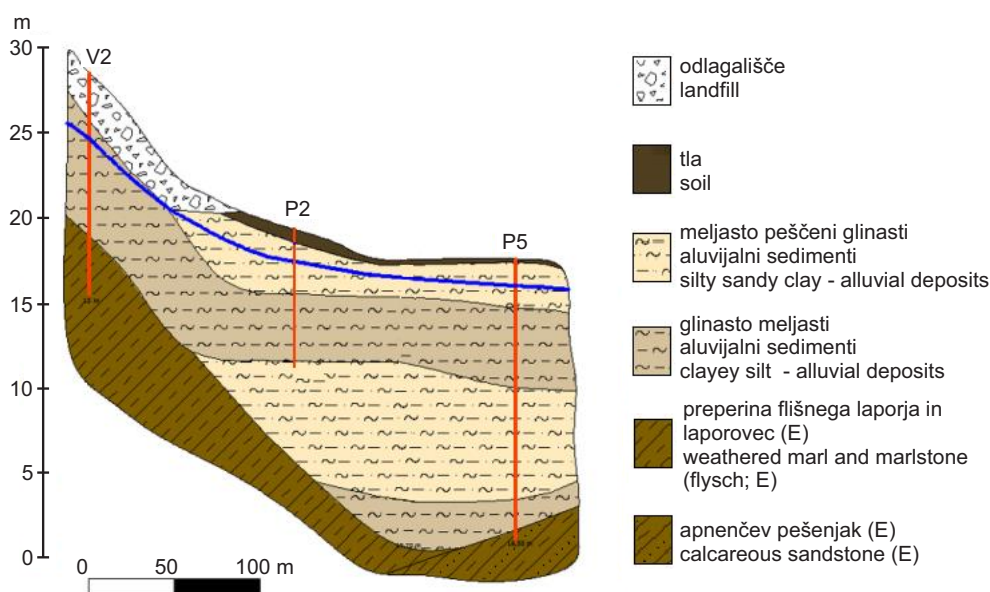
Opazovalna vrtina / Observation well	P1		P2		P5	
Kota površja / surface elevation	n.a.		21,06		17,40	
Obdobje / period	2005-2015	2009	2005-2015	2009	2005-2015	2009
Minimum / minimum	15,03	15,21	15,20	15,60	14,15	14,19
Maksimum / maximum	18,42	17,47	19,02	19,00	16,43	16,33

Med cesto in odlagališčem sta locirani vrtini P1 in P2. V vrtini 2 so klastični lapornati sedimenti v globini 6 metrov. Deluvialni preperinski pokrov na teh klastih se od aluvija reke Dragonje razlikuje po svetlejši barvi in po vsebnosti ostroboh delcev matične kamnine. Maksimalna debelina kvartarnih sedimentov je ocenjena med 20 in 30 metri. Sedimenti v dolini Dragonje so heterogeni in se lokalno spreminjajo. Gre za meljasto – glinaste sedimente rjave barve, ki vsebujejo organske ostanke. Pod naplavinami so temno sive do modre plastične gline. V njih so na določenih mestih prisotni ostanki organskega izvora in posamezni prodniki ali drobcji matičnih klastičnih

ter karbonatnih kamnin. V temnejši glinasti plasti so peščene leče, v katerih je podzemna voda, ki ima vonj po razpadajočem organskem materialu v glini (Rogelj, 1992). Kvartarne naplavine na območju vrtine P5 so debele približno 16 metrov (sl. 3). Pod njimi je flišna serija klastitov z vložki karbonatnih peščenjakov. Podlaga je paleocenski apnenec in se pogreza proti jugozahodu, dviga pa se proti severozahodu (Rogelj, 1992).

Flišni laporovec ima zelo nizko prepustnost. Med posameznimi litološkimi členi fliša so prisotne velike razlike v prepustnosti. Nekoliko hitrejši tok podzemne vode znotraj flišev je možen le v kalkarenitnih in karbonatnih brečah ter peščenjakih (koeficient prepustnosti je med 10^{-5} m/s in 10^{-6} m/s; Rogelj, 1992; Fuks, 2010). Hidravlične lastnosti kvartarnih sedimentov in preperine fliša se lokalno zelo spreminjajo. Ocenjeni koeficient prepustnosti v bolj peščenem delu meljasto glinaste preperine fliša znaša manj kot 10^{-5} m/s, v območju s prevladujočo meljasto in glinasto komponento pa 10^{-7} m/s (Rogelj, 1992). V bolj heterogenem delu slabo prepustnega odprtega medzrnskega vodonosnika v dolini Dragonje se v zgornjem delu prepustnosti gibljejo znotraj dekade 10^{-7} m/s, medtem ko so v spodnjem delu glinaste plasti s prepustnostjo $2,5 \cdot 10^{-8}$ m/s (Rogelj, 1992).

Na območju pobočja hriba, kjer se nahaja samo telo odlagališča, je tok podzemne vode v debelejši preperini flišnih kamnin, po pobočju navzdol v smeri proti jugozahodu. Voda se preceja vzdolž prepustnejših leč peskov in meljev ter posredno napaja tudi vodo v fliših (sl. 3). V flišnih plasteh (brečah ter peščenjakih) je generalna smer toka podzemne vode vezana na vpad plasti, zato se voda najverjetneje pretaka v smeri proti severo-



Sl. 3. Prerez odlagališča z vrtinami (povzeto po Rogelj, 1992 in Ivanuša-Šket et al., 2017).

Fig. 3. Cross-section of the landfill area with boreholes (after Rogelj, 1992 in Ivanuša-Šket et al., 2017).

zahodu. Slabo prepustni hidro dinamsko odpri vodonosnik (rečne naplavine Dragonje) se napaja z vodo s flišnih pobočij iz severa, kot tudi iz vzhoda v gorvodno smeri glede na tok reke Dragonje (Rogelj, 1992). Generalni tok podzemne vode je v smeri od severovzhoda proti jugozahodu (sl. 2, Rogelj, 1992; Fuks, 2010; Ivanuša-Šket et al., 2017).

Odlagališče nima vpliva na reko Dragonjo, zato se monitoring površinske vode ne izvaja (Ivanuša-Šket et al., 2015).

Metodologija izvedbe sledilnega preizkusa na odlagališču Dragonja

Injicirano količino uranina smo določili s formulo (Kass, 1998):

$$M = \alpha \cdot L \cdot A, \quad (1)$$

kjer je L razdalja med točko injiciranja uranina in mestom vzorčenja (0,225 km), α je faktor za uranin, ki znaša 1 ter A je faktor vodonosnika, ki ga preučujemo in obsega vrednosti za medzrnski vodonosnik od 0,1 do 0,5; razpokliski vodonosnik od 0,2 do 4; kraški vodonosnik od 1 do 10. Zaradi kompleksnosti obravnavanega sistema so bile privzete vrednosti A med 3 in 5. Za injiciranje smo se odločili, da bomo uporabili 990 g uranina, saj so prepustnosti zelo majhne, poleg tega je možna prisotnost organskih snovi na katere se uranin adsorbira.

Sledilni poskus se je začel 11. junija 2008. Na ta dan smo na vrhu odlagališča oziroma za stari delom z rovokopačem izkopal jamo dimenzij $2,5 \times 2,5$ metra (sl. 4). Globina jame je na najglobljem delu znašala približno 2,5 metra. Globina do podzemne vode v flišni preperini je bila ocenjena na ca 2 m. V 50 litrih vode smo raztopili 990 gramov uranina, preostalih 10 gramov pa smo shranili za izdelavo umeritvene krivulje. Raztopino



Sl. 4. Injiciranje in spiranje uranina.

Fig. 4. Uranine tracer injection.

uranina smo zlili v izkop in dodali še 600 litrov vode. Ko je barvilo povsem odteklo, smo izkop znova zasuli z izkopanimi odpadki.

Vzorčevanje podzemne vode je potekalo s črpalko v vrtinah P1, P2 in P5 v povprečju enkrat na teden oziroma dva do tri dni po večjem nalivu. Kljub majnim črpalnim količinam so se vrtine zaradi nizkih prepustnosti in plivosti hitro spraznile. Analizo vzorcev (določitev koncentracije uranina) je bila narejena na Inštitutu za raziskovanje krasi v Postojni z luminiscenčnim spektrometrom Perkin Elmer pri ekscitacijskem maksimumu E_{ex} 491 nm in emisijskem maksimumu E_{em} 512 nm z mejo določljivosti $0,005 \text{ mg/m}^3$ ($1 \text{ mg/m}^3 = 1 \text{ ppb}$),

Rezultati in diskusija

Injicirani uranin se je pojavil v vseh treh opazovalnih vrtinah. Na sliki 5 je z rdečo navpično črto označen dan injiciranja uranina, črna vodovodna črta, ki označuje koncentracijo $0,03 \text{ mg/m}^3$, pa predstavlja koncentracijo uranina v vzorcih vode iz opazovalnih vrtin P1 in P2 pred izvedbo sledilnega poskusa. Vzorčevanje je potekalo od junija 2008 do januarja 2009.

Koncentracije uranina v posameznih vrtinah glede na obdobje močno varirajo (sl. 5). Uranin se je najhitreje pojavil v vrtini P2, ki je dolvodno od mesta injiciranja v smeri toka vode po preperini. Prvi pojav uranina je bil zaznan v prvem vzorčenju po injiciranju, vendar se je verjetno pojavil že prej. V vrtini P2 je bila po 30 dneh dosežena tudi najvišja koncentracija uranina v celotnem času vzorčevanja ($0,554 \text{ mg/m}^3$), ki se je pojavila 23 dni po večjih padavinah v sredini junija (18.6.2008; 44,8 mm). Hitrost toka po preperini v času največje koncentracije (dominantna hitrost toka) je tako $7,5 \text{ m/d}$ (tabela 2) oziroma ob upoštevanju datuma padavin celo $9,8 \text{ m/dan}$. V vrtini P2 so opazna največja nihanja koncentracij uranina. Po določenem obdobju padavin koncentracija uranina v vrtini P2 zelo naraste in nato hitro upade, kar nakazuje na relativno hiter tok vode. Voda se do vrtine P2 najverjetneje pretaka po bolj prepustnem območju flišne preperine po t.i. prednostnih poteh.

V vrtini P1 se je sledilo prvič pojavilo 66 dni po injiciranju, najvišja koncentracija pa je bila dosežena po 83 dneh ($0,083 \text{ mg/m}^3$). Hidravlične lastnosti preperine fliša se lokalno zelo spreminjajo, zato je lahko sledilo do vrtine P1 teklo po manj prepustnem območju flišne preperine in je zato tok počasnejši. Predvidevamo, da se je sledilo po prvih padavinah spralo v flišno preperino in potem počasi teklo do vrtine P1. Več padavinskih

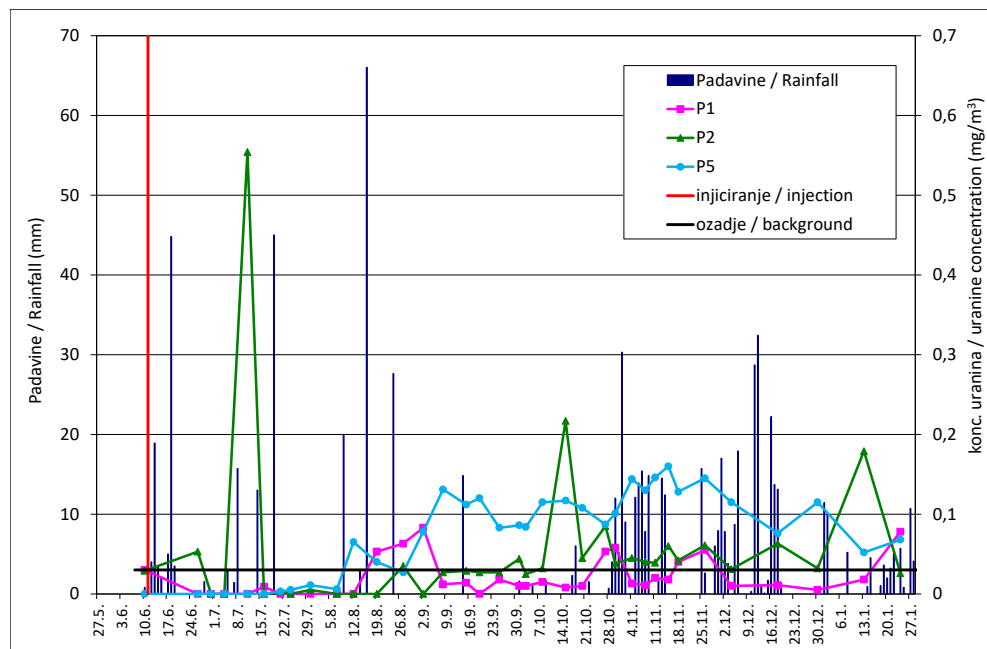
dogodkov sredi avgusta niso bili glavni razlog za takratni pojav sledila, kar potrjuje tudi upadanje gladine podzemne vode v vrtini (sl. 6). V tem času je namreč evapotranspiracija zelo velika. Dominantna hitrost toka je tako 2,7 m/d (tabela 2).

Tabela 2. Izračun navideznih dominantnih hitrosti pretakanja podzemne vode.

Table 2. Estimation of apparent dominant velocities of groundwater flow.

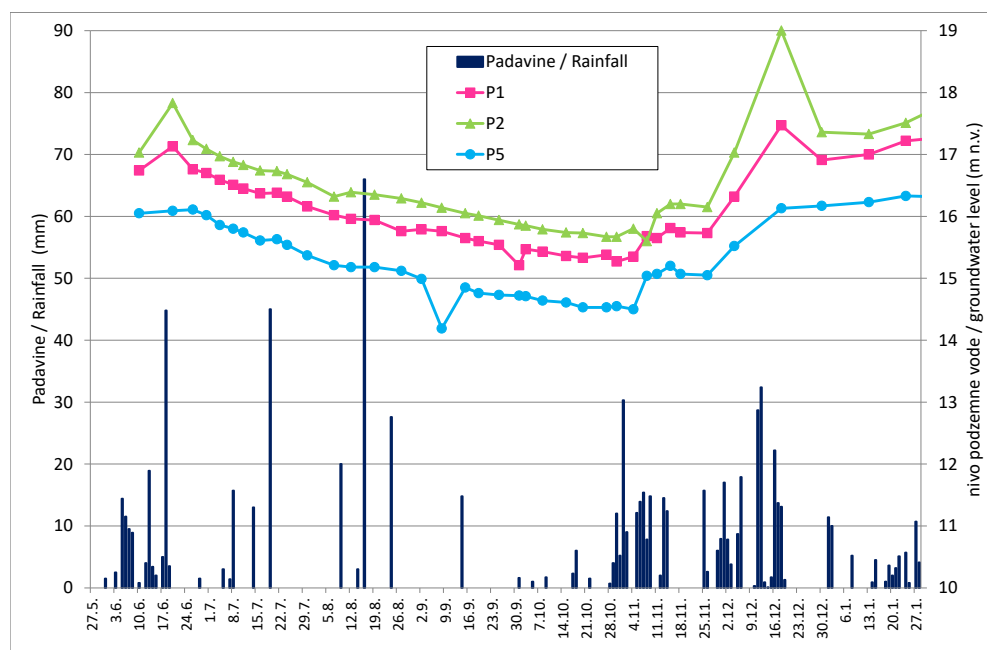
Opazovalna vrtina / observation well	Razdalja / distance (m)	C_{max} (mg/m ³)	t_{dom} (d)	v_{dom} (m/d)
P1	225	0,083	83	2,7
P2	225	0,554	30	7,5
P5	295	0,16	157	1,9

Vrtina P5 je dolvodno od vrtin P1 in P2. Na dinamiko transporta uranina do vrtine P5 imajo pomemben vpliv tako preperina fliša pod odlagališčem kot tudi sedimenti v aluvialnem nanosu reke Dragonje. Tu se uranin razredči v podzemni vodi. Padavine sledilo najprej sperejo skozi odpadke na odlagališču, potem sledilo potuje po preperinski plasti fliša, ko pride do aluvialne ravnice pa skozi plitvo nezasičeno cono sedimentov do podzemne vode. Zaradi tega in zaradi slabše prepustnosti so časi potovanja do vrtine P5 daljši, pojavljanja uranina pa zaradi dušenega vpliva predstavlja široko območje. Poleg tega se uranin v glinastih sedimentih sorbira na organske delce. Koncentracije uranina v P5 so se od



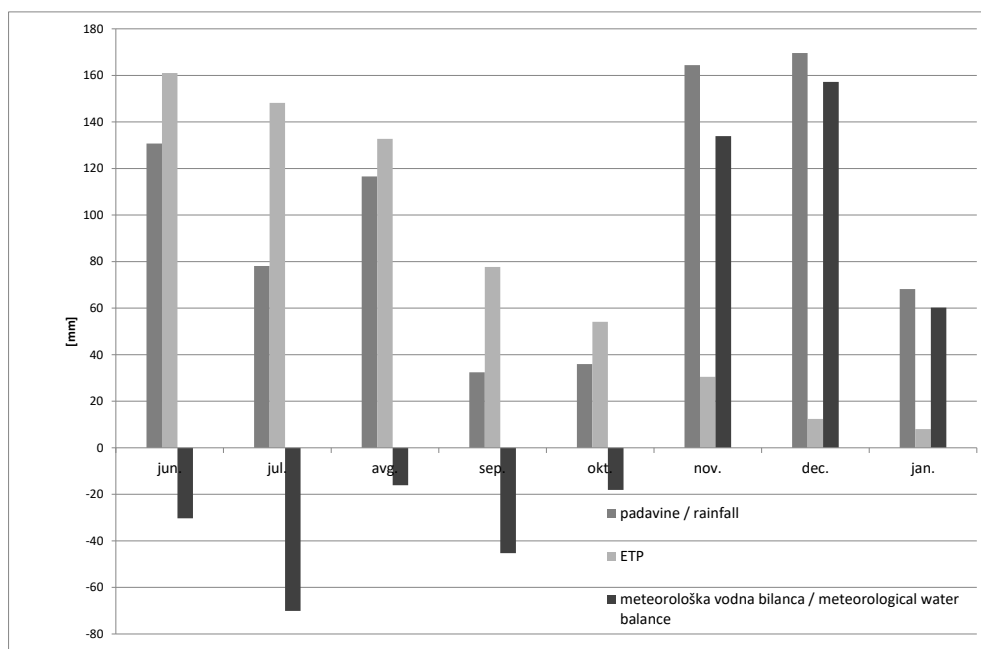
Sl. 5. Količina padavin in koncentracije uranina v vzorcih vode v opazovalnih vrtinah P1, P2 in P5

Fig. 5. Rainfall and uranine concentrations in observation wells P1, P2 and P5.



Sl. 6. Količina padavin in nivoji podzemne vode v vrtinah P1, P2 in P5 v času izvajanja sledilnega poskusa.

Fig. 6. Rainfall and groundwater levels in observation wells P1, P2 in P5 in the time of the tracer experiment.



Sl. 7. Meteorološka vodna bilanca.

Fig. 7. Meteorologic water balance.

avgusta počasi zviševale in se v novembru začele ponovno zniževati. Sledilo se je prvič pojavilo 59 dni po injiciranju, najvišja koncentracija je bila dosežena po 157 dneh ($0,160 \text{ mg/m}^3$). Dominantna hitrost toka je $1,9 \text{ m/d}$ (tabela 2). Na hitrost potovanja in koncentracijo uranina vpliva tudi geološka sestava tal. Aluvialni vodonosnik (sedimenti) ima na različnih globinah različno vodoprepustnost. Na površju, to je do 1 m globine je prepustnost ocenjena na $4,06 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$, od 1 m pa do 2 m pa na $1,25 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ (Rogelj, 1992). Pod dvema metri pa je prepustnost še manjša ($k=2,56 \cdot 10^{-8}$; Rogelj, 1992). Prepustnost sedimentov je zelo slaba, saj se je po črpanju iz vrtine nivo vode zelo počasi vzpostavil na začetni nivo.

Nivoji podzemne vode so bili pred vsakim vzorčenjem merjeni z ročnim merilcem. Nivoji podzemne vode so v vseh treh piezometrih upadali do konca oktobra, ko so začeli naraščati po jesenskem deževnem obdobju (sl. 6). Večina sledilnega poskusa je tako potekala v sušnem obdobju oz. obdobju minimalnega napajanja. Na nivo podzemne vode in količino padavin, ki se infiltrira skozi odlagališče ali tla do podzemne vode ter posledično koncentracijo uranina v vodi, vpliva evapotranspiracija. Delež infiltrirane vode lahko ocenimo iz meteorološke vodne bilance. Najvišje vrednosti potencialne evapotranspiracije so v mesecu juniju, juliju in avgustu. Potencialna evapotranspiracija je višja kot količina padavin vse do oktobra, torej je vodna bilanca negativna (sl. 7). Vendar vsa padavinska voda ni izhlapela, saj se je del infiltriral v tla/odlagališče, en del pa je zaradi naklona pobočja površinsko odtekel proti spodnjemu delu odlagališča. V tem

času so bile tudi koncentracije uranina v vzorcih vode relativno nizke, narasle so le po obilnejših kratkotrajnih obdobjih padavin. Nato koncentracije uranina narastejo, ko pozno jeseni oziroma v začetku zime (november, december) padejo večje količine padavin.

Zaključki

S sledilnim poskusom smo ugotavljali dinamiko prenosa onesnaževal iz odlagališča odpadkov v podzemno vodo. Odlagališče leži na eocenskih flišnih kamninah, oziroma na preperini flišnih kamnin. Uranin je bil injiciran gorvodno od odlagališča, vzorčevanje pa je potekalo v vrtinah dolvodno od odlagališča. Vrtini P1 in P2 sta med odlagališčem in aluvialno ravnico reke Dragonje, vrtina P5 pa na sami ravnici.

Prenos uranina je odvisen od več faktorjev, in sicer količine padavin, potencialne evapotranspiracije, prepustnosti sedimentov, infiltracije padavin v odlagališče odpadkov in zasičenosti flišne preperine pod odlagališčem. Hidravlične lastnosti preperine fliša se lokalno zelo spreminjajo, kar so potrdili tudi rezultati sledilnega poskusa. Uranin se je najprej pojavil v vrtini P2, ki je dolvodno od mesta injiciranja v smeri toka vode po preperini. V tej vrtini se je koncentracija uranina po določenem obdobju padavin relativno hitro povišala, kar nakazuje na relativno hiter tok podzemne vode. Glede na kasnejši pojav sledila pa je sledilo do vrtine P1 teklo po manj prepustnem območju flišne preperine in je zato tok počasnejši. Predvidevamo, da se je sledilo po prvih padavinah spralo v flišno preperino in potem počasi teklo do vrtine P1. Stari del odlagališča je na vzhodnem

delu, novi pa na zahodnem, naslanjata se drug na drugega in v naravi nista ločena, zato je meja ni čisto jasna. Novi del odlagališča je zahodno, poteka v smeri sever–jug, sledilo pa je najverjetneje teklo po pobočju, ki je v smeri NE–SW, zato domnevamo, da je večino poti sledilo teklo pod starim delom odlagališča. Podzemna voda iz flišne preperine se izliva v aluvialno ravnico, koncentracije uranina pa se razredčijo v podzemni vodi. Zaradi tega je v vrtini P5 zaznan počasen dvig in upad koncentracije uranina.

Nivoji podzemne vode so vse od junija pa do oktobra upadali. V tem času je evapotranspiracija večja od padavin. Nivoji podzemne vode so ponovno narasli šele po daljšem deževnem obdobju v jeseni. Zaradi tega bi bila zanimiva izvedba sledilnega poskusa tudi v jesenskem obdobju.

Pomanjkljivost opisanega sledilnega poskusa je tudi v pomanjkanju podatkov zaradi fizičnega vzorčenja, zato bi bila potrebna izvedba sledilnega poskusa z zveznim merjenjem koncentracije uranina. Ponovna izvedba sledilnega poskusa bi omogočila boljši vpogled v dinamiko podzemne vode, saj je sedaj na voljo veliko več opazovalnih vrtin.

Za učinkovito izvajanje monitoringa podzemne vode bi bilo potrebno izvrtati še eno vrtino gorvodno od odlagališča, s katero bi se določilo naravno ozadje parametrov v podzemni vodi, ki so določeni v programu monitoringa. V preteklosti so že poskusili vzpostaviti gorvodno opazovalno mesto, vendar nikjer ni bilo možno zajeti podzemne vode. Zaradi tega se kot referenčno mesto uporablja vrtina v aluvijalnem vodonosniku, ki ni pod neposrednim vplivom odlagališča, kar pa ni najbolj idelana rešitev, saj so na tem območju nesanimirana stara bremena (nelegalna odlagališča), katerih lokacije niso povsem znane.

Viri in literatura

- ARSO 2019: Agencija Republike Slovenije za okolje, Atlas okolja (dostopno 15. december 2019), <http://gis.arso.gov.si/atlasokolja>
- Brenčič, M., Gale, U. & Mali, N. 2003: Konceptualni model toka podzemne vode na območju deponije Dragonja. Ljubljana, Geološki zavod Slovenije, Oddelek za hidrogeologijo, Ljubljana.
- Caicedo, D. 2013: A study of the structure in solid wastes and some implications for fluid flow in landfills. University of Southampton, Faculty of Engineering and the Environment, Doctoral Thesis, Southampton: 347 p.
- Čenčur Curk, B., Pregl, M., Petrič, M. & Kogovšek, J. 2007: Hidrogeološki monitoring odlagališč na krasu. V: mednarodna konferenca „gospodarjenje z odpadki, okoljska geotehnologija in trajnostni razvoj“: ICWMEGGSD'07 - GZO'07, avgust 28.-30., 2007, Ljubljana, Slovenija. Naravoslovnotehniška fakulteta, oddelek za geotehnologijo in rudarstvo, Ljubljana: 12 p.
- Fuks, T. 2010: Hidrogeološke razmere na vplivnem območju odlagališča odpadkov Dragonja. Diplomsko delo. Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Ljubljana: 55 p.
- Hudson, A.P. 2007: Evaluation of the vertical and horizontal hydraulic conductivities of household wastes. University of Southampton, School of Civil Engineering and the Environment. Doctoral Thesis. Southampton: 255 p.
- Ivanuša-Šket, H., Glazer, V., Brenčič, M. & Keršmanc, T. 2015: Noveliran program monitoringa podzemnih voda za odlagališče nenevarnih odpadkov Dragonja. Nacionalni laboratorij za zdravje in hrano, Center za okolje in zdravje, Oddelek za okolje in zdravje Maribor, Maribor: 56 p.
- Ivanuša-Šket, H., Glazer, V., Brenčič, M. & Vidmar, I. 2017: Ocena razširjenosti onesnaževal v prostoru, skladno s točko 8.3 programa ukrepov v primeru preseganja opozorilne spremembe parametrov podzemne vode odlagališče nenevarnih odpadkov Dragonja. Nacionalni laboratorij za zdravje in hrano, Center za okolje in zdravje, Oddelek za okolje in zdravje Maribor, Maribor: 100 p.
- Jerebica, D. 2009: Vpliv odlagališča komunalnih odpadkov Dragonja na podzemno vodo. Diplomsko delo. Univerza v Novi Gorici, Nova Gorica: 57 p.
- Jolly, J.M., Beaven, R.P. & Barker, R.D. 2011: Resolution of electrical imaging of fluid movement in landfills. In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management, 164/2: 79–96. <https://doi.org/10.1680/warm.2011.164.2.79>
- Kass, W. 1998: Tracing technique in geohydrology. Balkema, Rotterdam: 581 p.
- Kogovšek, J. & Petrič, M. 2006: Tracer test on the mala gora landfill near Ribnica in southeastern Slovenia. Acta carsologica, 35/2: 91–101. <https://doi.org/10.3986/ac.v35i2-3.232>
- Kogovšek, J. & Petrič, M. 2007: Directions and dynamics of flow and transport of contaminants from the landfill near Sežana (SW Slovenia).

- Acta carsologica, 36/3: 413-424. <https://doi.org/10.3986/ac.v36i3.531>
- Kogovšek, J. & Petrič, M. 2010: Tracer tests as a tool for planning the monitoring of negative impacts of the Mozelj landfill (SE Slovenia) on karst waters, *Acta carsologica*, 39/2: 301-311. <https://doi.org/10.3986/ac.v39i2.101>
- Marius, M.S., Stringfellow, A., Smallman, D. & Atkinson, T. 2010: Fluorescent tracers - a tool for landfill investigation and management. In: *Waste 2010, Waste & Resource Management: putting strategy into practice. Proceedings of the Waste 2010 conference. Waste Conference Ltd.*: 10 p.
- Mor, S., Ravindra, K., Dahiya, R.P. & Chandra, A. 2006: Leachate Characterization and assessment of groundwater pollution near municipal solid waste landfill site. *Environmental monitoring and assessment* 118, 1-3: 435-456.
- Prestor, J. & Janža, M. 2002: Vpliv Ljubljanskega odlagališča komunalnih odpadkov »Barje« na podzemno vodo. *Geologija*, 45/2: 505-512.
- Ratej, J. & Brenčič, M. 2005: Groundwater monitoring network for landfills establishment - Case study of Slovenia. In: *Tenth International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia 2005*.
- Rogelj, J. 1992: Poročilo o rezultatih hidrogeoloških raziskav za sanacijo odlagališča odpadkov v Dragonji. Ljubljana, Geološki zavod Ljubljana, 18 p.
- Rosqvist, H. & Bendz, D. 1999: An experimental evaluation of the solute transport volume in biodegraded municipal solid waste. *Hydrology and earth system sciences*, 3: 429-438. <https://doi.org/10.5194/hess-3-429-1999>
- Salama, R.B., Davis, G.B. & Barber, C. 1989: Characterizing the hydrogeological variability of a sand aquifer in the region of a domestic waste disposal site. In: *Sahuquillo, A., Andreu, J. & O'Donnell, T. (eds.): Groundwater management: Quantity and quality, IAHS Publication, 188: 215-226.*
- Smart, P. L. 1985: Applications of fluorescent dye tracers in the planning and hydrological appraisal of sanitary landfills. *Q.J. eng. Geol.* 18: 275-286.
- Uradni list RS, št. 49/06, 114/09, NPB1 in 53/15). Pravilnik o obratovalnem monitoringu onesnaževanja podzemne vode. Internet: <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=PRAV7617>
- Uradni list RS, št. 10/2014, 54/2015, 36/2016 in 37/2018. Uredba o odlagališčih odpadkov. Internet: <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED6660>
- Woodman, N., Rees-White, T., Stringfellow, A., Beaven, R.P. & Hudson, A.P. 2014: Investigating the effect of compression on solute transport through degrading municipal solid waste. *Waste Management*, 34/11: 2196-2208 <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.06.022>
- Woodman, N.D., Rees-White, T.C., Stringfellow, A., Beaven, R.P. & Hudson, A.P. 2015: Multiple-tracer tests for contaminant transport process identification in saturated municipal solid waste. *Waste Management*, 38, 250-262. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.12.012>
- Woodman, N.D., Rees-White, T., Beaven, R., Stringfellow, A. & Barker, J. 2017: Doublet tracer tests to determine the contaminant flushing properties of a municipal solid waste landfill. *Journal of Contaminant Hydrology*, 203: 38-50. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2017.05.008>
- Internetni viri:
Internet 1: http://www.geopedia.si/#T105_F450:19807541_x396628_y88985_s13_b4 (2019)



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

Izvelek

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 sprotnih 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 izvirov 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 vzpostavitev 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 pripravljene 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.

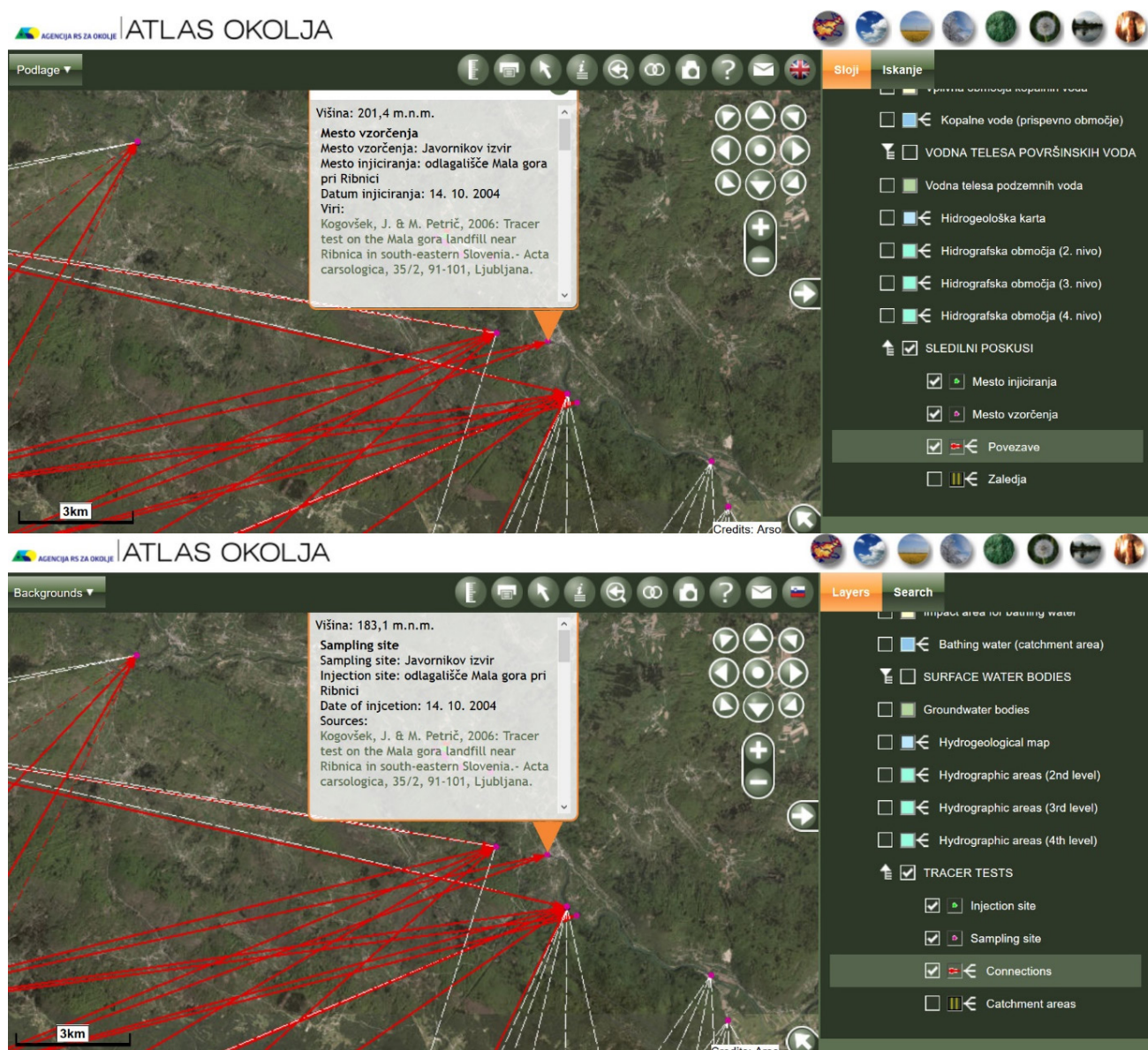
Oznaka atributa v MS Excelu Attribute label in MS Excel	Oznaka atributa v GIS podatkovni zbirki Attribute label in the GIS database	Opis pomena atributa <i>Description of the attribute's meaning</i>
ID	ID	primarni ID zbirke <i>primary database ID</i>
ID_S	ID_S	ID sledilnega poskusa; v primeru kombiniranega 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, »nezanesljivo« 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 (Odpri 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).

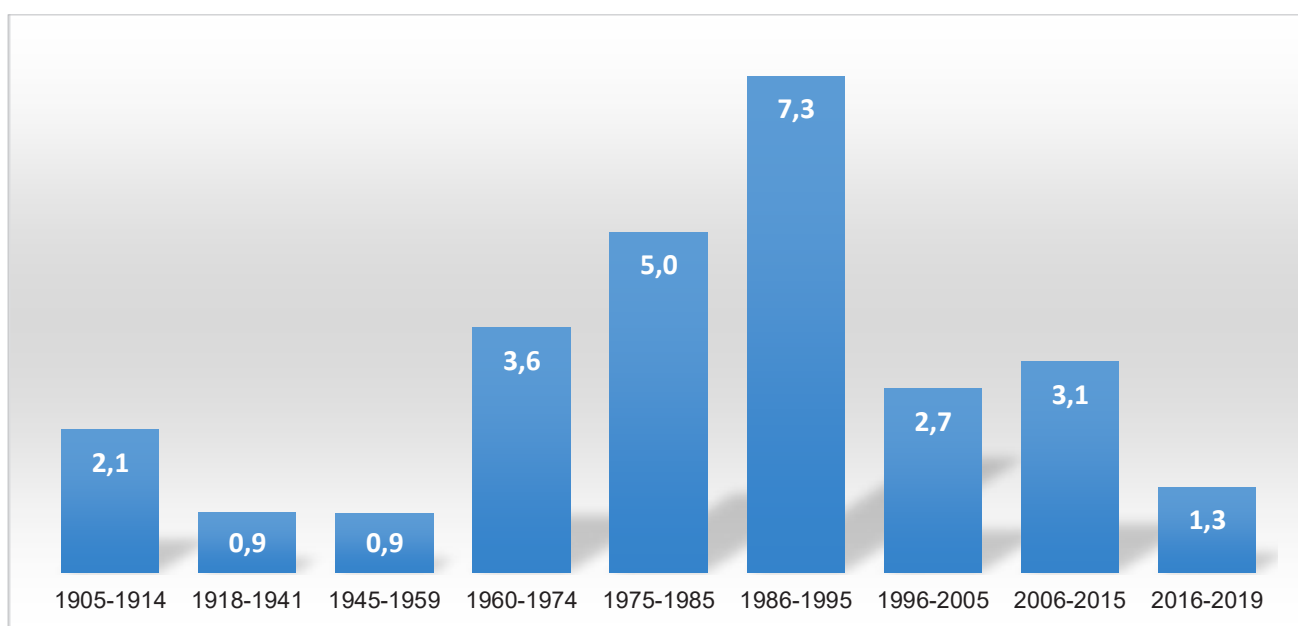
Kot je bilo v prvi fazi predvideno, je bilo v sklopu druge projektne naloge približno dve leti po prvi postavitvi zbirke izvedeno njeno obnavljanje in dopolnjevanje (dopolnjeni podatki za 28 sledenj in dodanih 31 novih sledenj). Podatke so, poleg Inštituta za raziskovanje krasa ZRC SAZU, prispevale tudi 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.

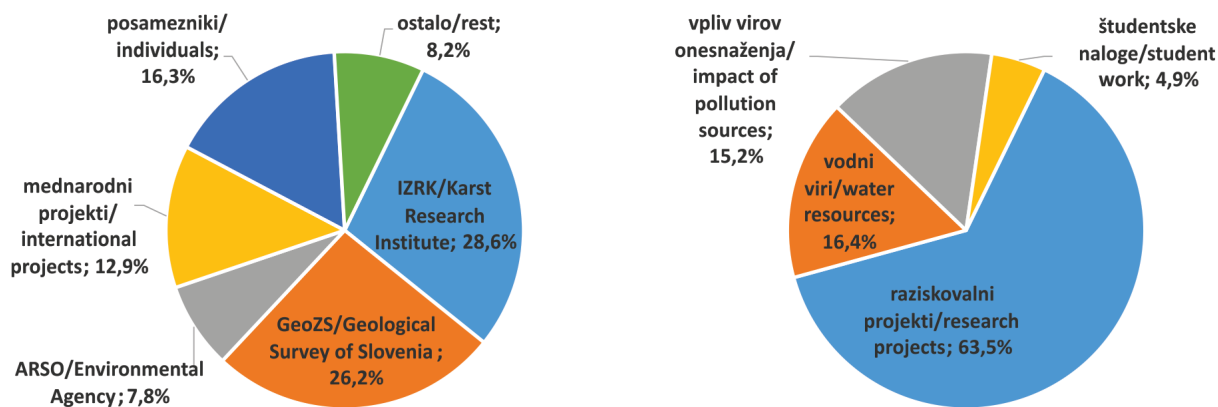
Značilnosti opravljenih sledilnih poskusov in dobljenih rezultatov

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 vojnama (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).

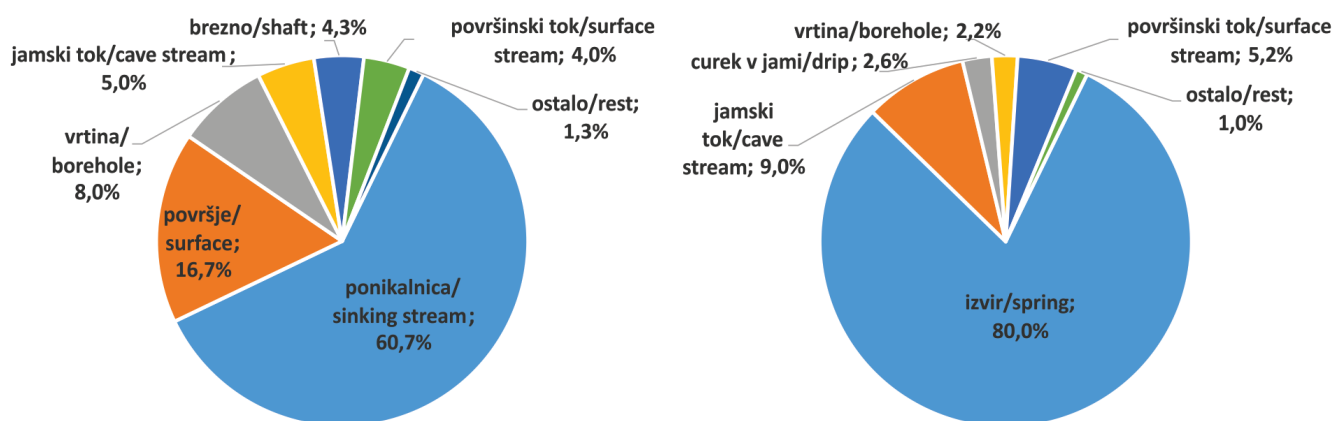
dvajsetih letih je število opravljenih sledenj upadlo (okrog 3 na leto), le nekaj več kot eno sledenje letno pa je bilo izvedeno v obdobju 2016–2019. Možna razlaga za tako nizko vrednost je tudi ta, da rezultati sledenj v teh zadnjih letih še niso bili ustrezno obdelani in objavljeni.

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-

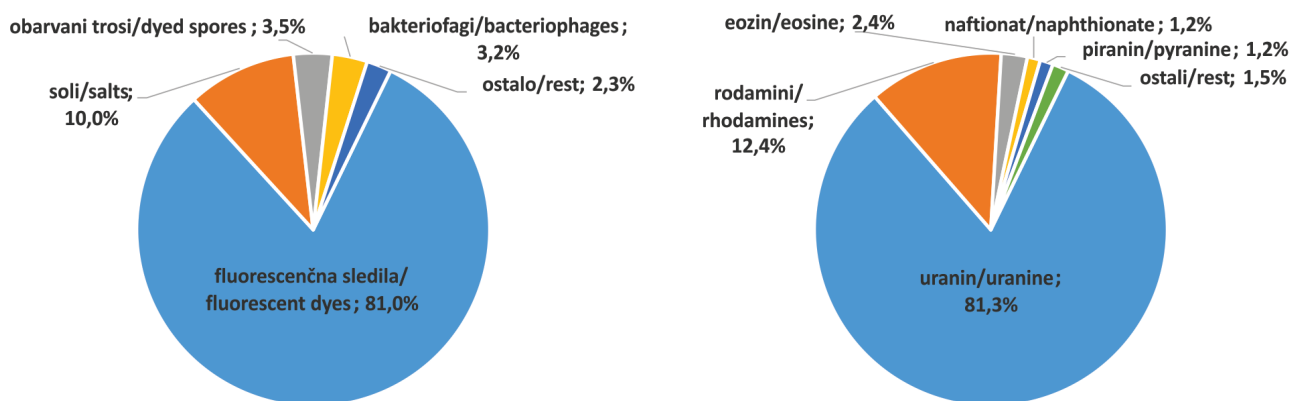
rih je bilo o namenu sledenja možno sklepati na osnovi besedila poročila. V veliki večini so bila sledenja izvedena v sklopu raziskovalnih projektov (63,5 %), kar kaže na to, da pomen in koristnost sledilnih poskusov še nista v zadostni meri prepoznana pri načrtovanju posegov v občutljiv kraški prostor (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 fluorescenčna 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).

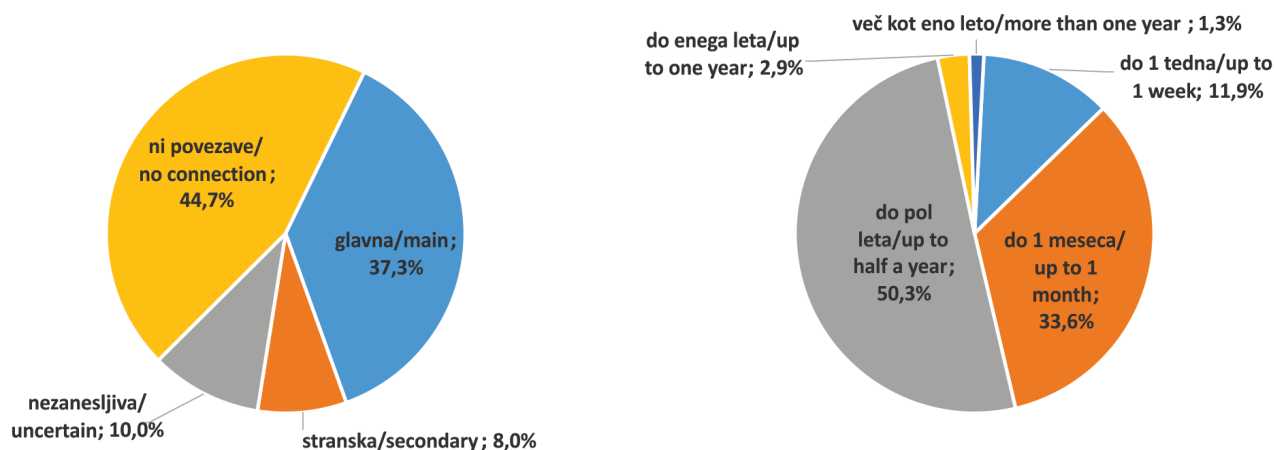
stojnsko jamo (7 sledenj). Še večkrat je bilo sledilo injicirano v različne ponore na Cerkniskem in Planinskem polju (skupaj 12 in 9). V zadnjih letih pa se sledilni poskusi vedno bolj uveljavljajo kot primerna metoda za študij značilnosti toka vode in prenosa snovi v vadozni (nezasičeni) coni z injiciranjem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

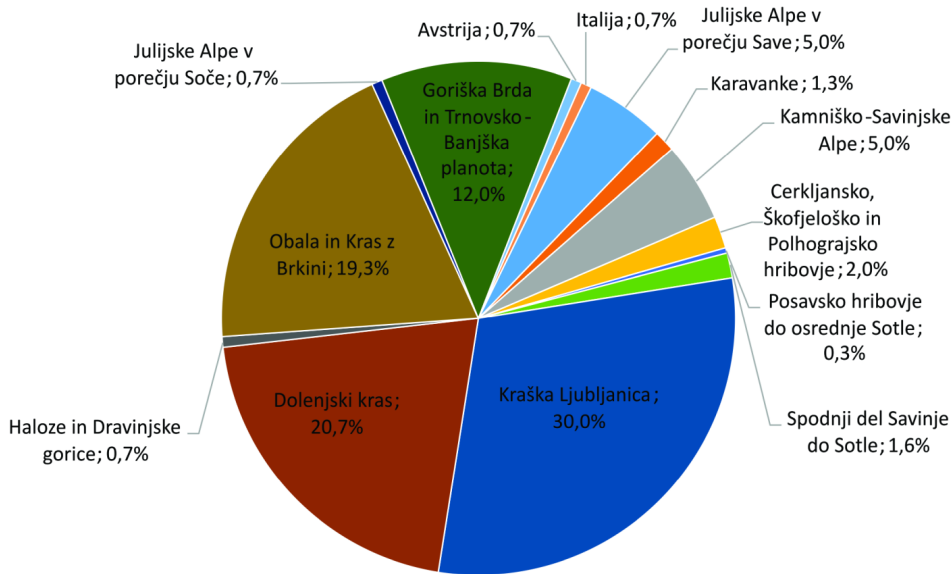
možnost, da se bo sledilo v njih pojavilo. Od dokazanih povezav je bilo 37,3 % glavnih, 8 % pa stranskih. Opredelitev povezave za nezanesljivo (10 %) ostaja v veliki meri stvar subjektivne ocene izvajalca sledenja, ki najbolje pozna razmere na proučevanem območju in lahko na tej osnovi najbolje ovrednoti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

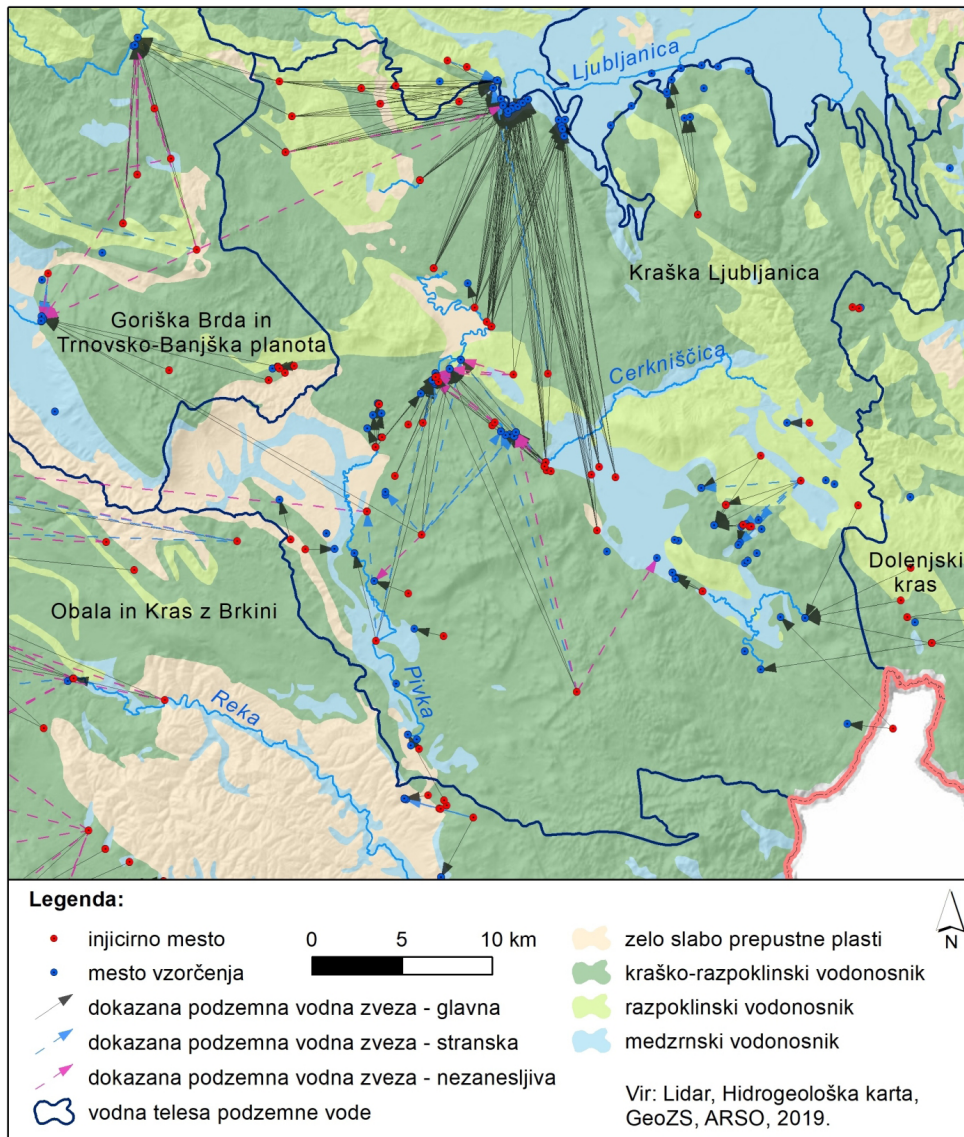
Običajno pa s sledilnimi poskusi ugotavljamo precej višje hitrosti pretakanja vode v krasu. Navidezne hitrosti določamo na osnovi primerjave med zračno razdaljo od točke injiciranja do točke pojava sledila in časom med trenutkom injiciranja in pojavom sledila. Pri tem ločimo med maksimalno (čas glede 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 / 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 izvornih virov podatkov in ustrezno ovrednotenje rezultatov posameznih sledilnih poskusov.

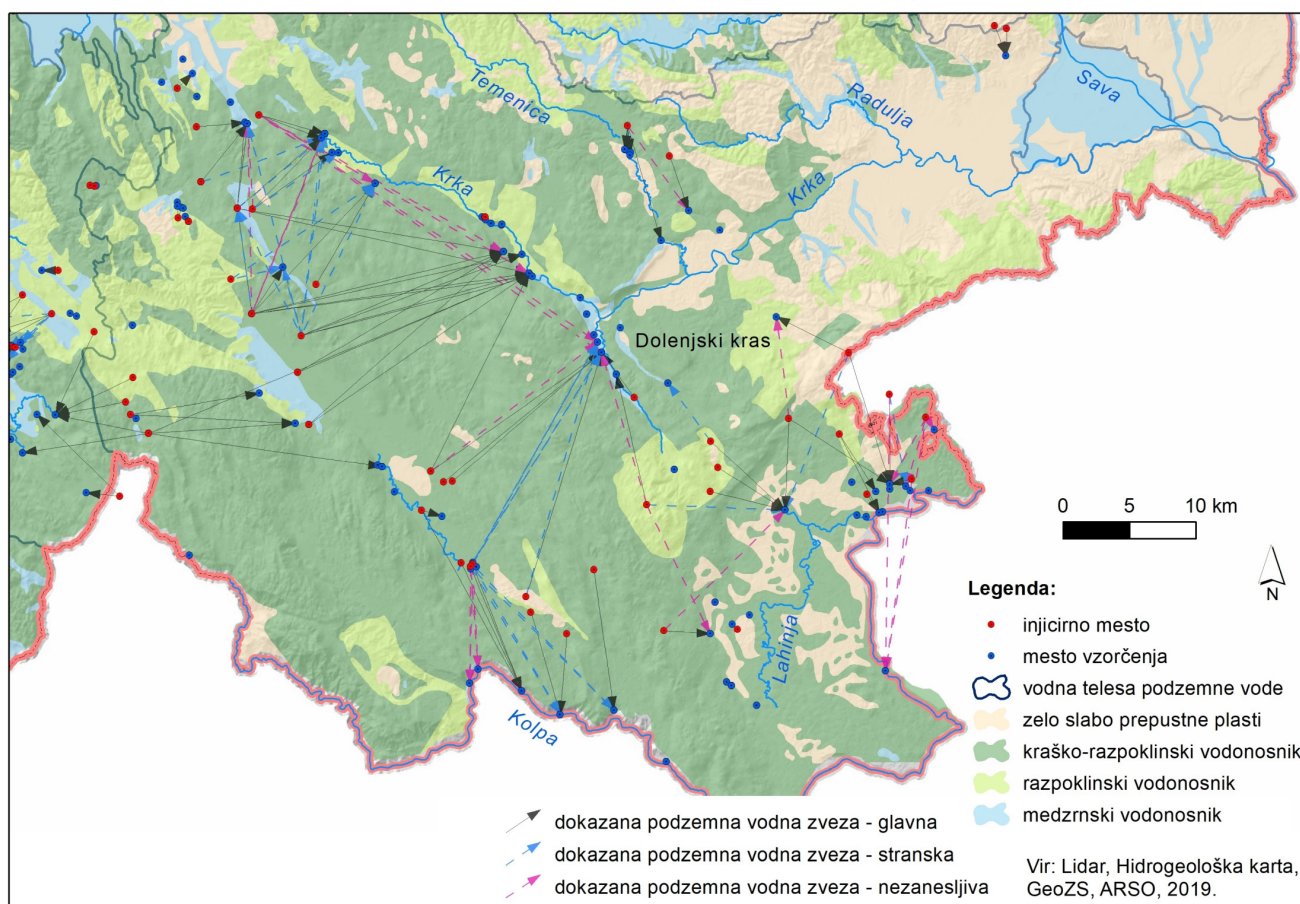
Sledilni poskusi in vodna telesa podzemnih vod

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 Ljublanica (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 izvirov v Sloveniji je bil dokazan tudi z injiciranjem sledil izven naših meja v Avstriji (0,7 % ali 2 injiciranj) 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 Ljublanica, predvsem v neposrednem zaledju Ljublanice (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.

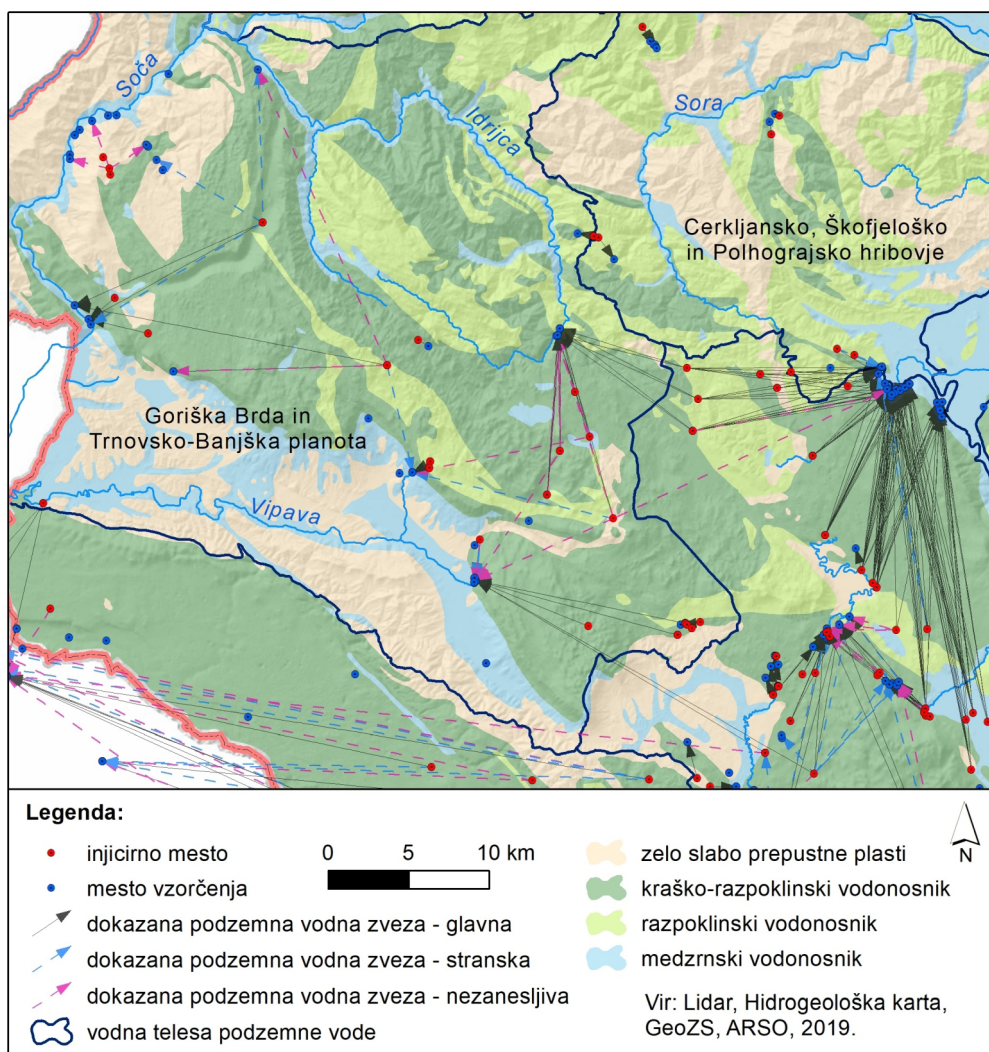
V vodnem telesu Cerkljansko, Škofjeloško in Polhograjsko hribovje prevladujejo razpoklinski vodonosniki, v katerih so bila zaradi narave toka v teh sistemih izvedena le sledenja na krajših razdaljah (sl. 11).

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.

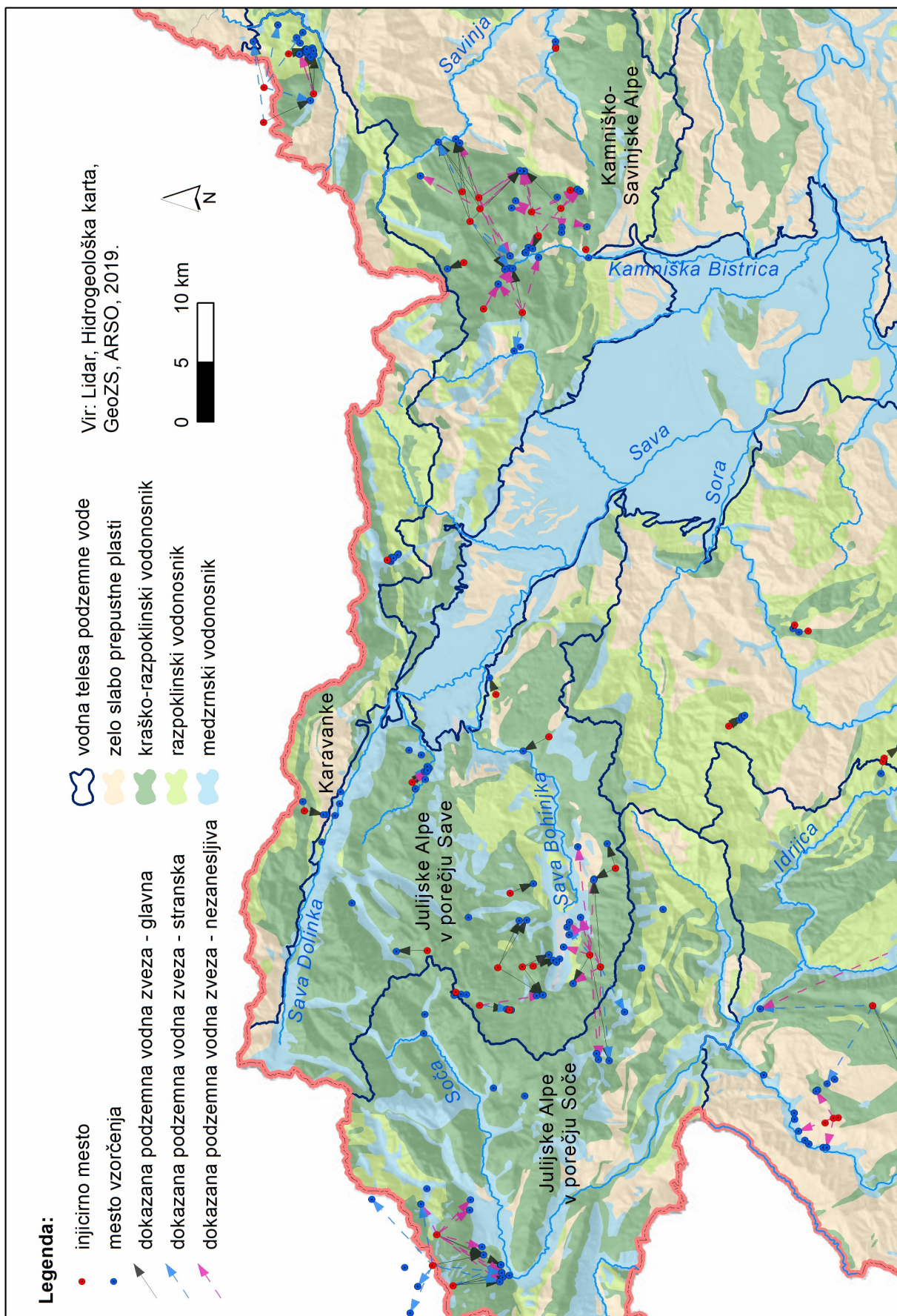
V vodnem telesu Obala in Kras z Brkini bi bila koristna dodatna sledenja na Snežniku ter na območju Vremščice in Košanske doline za določitev jadransko-črnomske razvodnice, brez izvedenih sledenj pa je zaenkrat tudi goriški del Krasa. V Goriških Brdih ni bilo opravljenih še nobenih sledenj, enako velja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

Projektne 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 Karste 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



Overview of existing information on important closed (or in closing phase) and abandoned mining waste sites and related mines in Slovenia

Pregled obstoječih informacij o pomembnejših zaprtih (ali v fazi zapiranja) in opuščenih odlagališčih rudarskih odpadkov in z njimi povezanih rudnikov v Sloveniji

Mateja GOSAR, Robert ŠAJN, Miloš MILER, Ana BURGER & Špela BAVEC

Geological Survey of Slovenia, Dimičeva ulica 14, SI-1000 Ljubljana, Slovenia; e-mail: mateja.gosar@geo-zs.si

Prejeto / Received 14. 1. 2020; Sprejeto / Accepted 8. 5. 2020; Objavljeno na spletu / Published online 7. 12. 2020

Key words: mining, mines, waste dumps, metals, coals, inventory

Ključne besede: rudarjenje, rudniki, odlagališča odpadkov, kovine, premogi, inventar

Abstract

The presented work provides a comprehensive inventory of data on closed (or in closing phase) and abandoned underground and surface mines and mining waste sites in Slovenia, collected within the framework of the Geological Survey of Slovenia (GeoZS) over the last two decades. Furthermore, a detailed overview of information on closed and abandoned mining waste sites in Slovenia is given.

In order to establish the inventory, a definition of the work methodology, a comprehensive research of the archived and published literature, and the harmonisation and management of the collected data was carried out. Based on a selected methodology, the inventory contains information on 33 metal mines, 43 coal mines, 51 non-metallic mineral resource mines, 156 waste sites from metal mines and 18 waste sites from coal mines. The inventory is in the open access [Google Earth file](#). It provides a basis for further research into the environmental impact of mining waste, which has been carried out since the EU Directive on the management of waste from extractive industries (Directive 2006/21/EC hereafter) was adopted into national law.

In general, about 11,621,333 m³ of waste sites from metal mines and 76,188,000 m³ of waste sites from coal mines are covering about 678 hectares of Slovenian territory. More than half (64 %) of the waste from metal mines was produced in the Mežica lead and zinc mine, while the other two mines with a still significant share of produced waste were the Idrija mercury mine (18 %) and the Žirovski vrh uranium mine (15 %). Among the closed coal mines, the largest amount (46 %) of waste was generated by the coal mine Trbovlje-Hrastnik, while the other two coal mines with still significant share of waste produced were Kočevje (28 %) and Kanižarica (17 %).

Izvleček

Prispevek članka je obsežni inventar podatkov o zaprtih (ali v fazi zapiranja) in opuščenih podzemnih in površinskih rudnikih in odlagališčih rudarskih odpadkov v Sloveniji, ki smo jih zbrali in uredili na Geološkem zavodu Slovenije (GeoZS) v zadnjih dveh desetletjih. Poleg tega podaja tudi podrobnejši pregled informacij o zaprtih in opuščenih odlagališčih rudarskih odpadkov v Sloveniji.

Za vzpostavitev inventarja smo definirali metodologijo dela, izvedli celovit pregled arhivirane in objavljene literature, uskladili zbrane informacije in vzpostavili upravljanje s podatki. Na podlagi izbrane metodologije inventar vključuje informacije o 33 rudnikih kovin, 43 premogovnikih, 51 rudnikih nekovinskih mineralnih surovin, 156 odlagališčih odpadkov iz rudnikov kovin in 18 odlagališčih odpadkov iz premogovnikov. Je prosto dostopen v obliki [Google Earth datoteke](#). Predstavlja osnovo za nadaljnje raziskave o vplivih rudarskih odpadkov na okolje, ki jih izvajamo odkar je bila v državne pravne okvirje sprejeta Uredba o ravnanju z odpadki iz rudarskih in drugih ekstraktivnih dejavnosti (v nadaljevanju Direktiva 2006/21/ES).

Okoli 678 hektarjev slovenskega ozemlja pokriva približno 11.621.333 m³ odlagališč odpadkov iz rudnikov kovin, 76.188.000 m³ odlagališč pa odpadkov iz premogovnikov. Več kot polovico (64 %) odpadkov iz rudnikov kovin je proizvedel rudnik svinca in cinka Mežica, preostala dva rudnika z znatnim deležem proizvedenih odpadkov pa sta bila rudnik živega srebra Idrija (18 %) in rudnik urana Žirovski vrh (15 %). Od premogovnikov je največji delež (46 %) odpadkov proizvedel premogovnik Trbovlje-Hrastnik, medtem ko sta bila preostala dva premogovnika z večjim deležem proizvedenih odpadkov Kočevje (28 %) in Kanižarica (17 %).

Introduction

Slovenia has a long and important history of prospecting, research, mining and exploitation of metallic (Hg, Pb, Zn, Mo, Cu, Mn, Ba, Al, Ag, Fe and Sb), non-metallic (mineral resources for construction, for the industry of construction materials and products, and for the processing industry) and energy (coal and uranium) mineral resources.

The review on metallic, non-metallic and energy mineral resources in Slovenia was written by Pirc and Herlec (2009) in the book *Geology of Slovenia*. In their work they also list the authors and their publications, in which the geological conditions of some of the mines discussed are explained.

Exploitation sites of oil, gas and geothermal energy are not part of this article.

At present, all metal and coal mines, except for the Velenje underground lignite mine, are closed or in the process of closing down. The exploitation of non-metallic mineral resources is ongoing. In the year 2017, there was a total of 206 exploitation sites for 25 different non-metallic mineral resources with mining rights in Slovenia (Senegačnik et al., 2018; Internet 1).

The majority of the mines currently closed or abandoned were operated at a time when environmental concerns were significantly lower. Consequently, the disposal of waste associated with mining was carried out mostly in a way that kept costs as low as possible and not to prevent pollution or facilitate rehabilitation. A similar situation has been observed in many other mining areas throughout Europe. For this reason, the *Directive on the management of waste from extractive industries (hereafter Directive 2006/21/EC)* was adopted by the European Commission to establish measures, procedures and guidance to prevent or reduce any adverse effects on the environment (in particular on water, air, soil, fauna and flora and the landscape, and any resulting risks to human health) arising from the management of waste from the extractive industries. These measures cover the management of waste resulting from prospecting, extraction, treatment and storage of mineral resources and the working of quarries (Directive 2006/21/EC). Directive 2006/21/EC was transposed into national law in 2008 (Official Gazette, No. 43/08 and 30/11).

Geological survey of Slovenia (GeoZS) started collecting information on mining waste during the preparation of EU Directive 2006/21/EC under the supervision of the former Ministry of Environment, Infrastructure and Energy and the

Uvod

Slovenija ima dolgo in pestro zgodovino iskanja, raziskovanja, rudarjenja in izkoriščanja kovinskih mineralnih surovin (Hg, Pb, Zn, Mo, Cu, Mn, Ba, Al, Ag, Fe in Sb), trdnih energetskih surovin (premog in uran) in nekovinskih mineralnih surovin (mineralne surovine za gradbeništvo, za industrijo gradbenih materialov in proizvodov ter za predelovalno industrijo).

Novejše pregledno delo o mineralnih kovinskih in nekovinskih ter energetskih surovinah na ozemlju sedanje Slovenije sta napisala Pirc & Herlec (2009) v knjigi *Geologija Slovenije*. V svojem delu sta navedla avtorje in njihove publikacije o geoloških danostih nekaterih rudnikov, ki so obravnavani v tem prispevku.

Območij pridobivanja nafte in plina ter geotermalne energije v tem prispevku ne obravnavamo.

Danes so vsi rudniki kovin in premogovniki z izjemo podzemnega rudnika lignita Velenje zaprti ali so v fazi zapiranja. Izkoriščanje nekovinskih mineralnih surovin pa v veliki meri poteka še danes. Leta 2017 je bilo v Sloveniji 206 pridobivalnih prostorov, kjer se je izkoriščalo 25 različnih nekovinskih mineralnih surovin (Senegačnik et al., 2018; Internet 1).

Večina danes zaprtih in opuščanih rudnikov je obratovala v času, ko skrb za okolje še ni bila tako močno izražena kot danes. Posledično je imelo pri odlaganju rudarskih odpadkov prednost zmanjševanje stroškov. Preprečevanje onesnaževanja in sanacijski ukrepi niso bili tako pomembni kot danes. Podobna stanja so bila tudi v mnogih območjih rudarjenja drugod po Evropi. Zaradi tega je Evropska komisija leta 2006 sprejela Uredbo o ravnanju z odpadki iz rudarskih in drugih ekstraktivnih dejavnosti (v nadaljevanju Direktiva 2006/21/ES), s katero je določila ukrepe, postopke in smernice za preprečevanje ali zmanjševanje škodljivih vplivov na okolje (zlasti vode, zraka, tal, favne in flore, pokrajine ter tveganj za zdravje ljudi), ki so nastali kot posledica ravnanja z odpadki iz ekstraktivnih dejavnosti. Ti ukrepi zajemajo ravnanje z odpadki, ki nastanejo pri raziskovanju, pridobivanju, bogatenju in skladiščenju mineralnih surovin. Direktiva 2006/21/ES je bila leta 2008 prenesena tudi v pravni red Slovenije (Uradni list RS, št. 43/08 in 30/11).

Geološki zavod Slovenije (GeoZS) je pričel z zbiranjem podatkov o rudarskih odpadkih že med pripravo Direktive 2006/21/EC in sicer v okviru nalog za nekdanje Ministrstvo za okolje, prostor in energijo ter nekdanje Ministrstvo za

former Ministry of Economy. At that time, the information on mining waste was not collected and managed by a single organisation but scattered in the archives of the mines and research organisations as well as in studies of various research institutions. In addition, some data was reported in books, scientific articles, thematic maps, and others. With the intention of collecting and compiling existing information on closed and abandoned mining waste sites, a systematic collection of data on closed or abandoned mines and related mining waste was carried out between 2003 and 2013 (Budkovič et al., 2003, 2004, 2005, 2006, 2008; Gosar et al., 2007, 2013a, 2013b). Budkovič et al. (2003, 2004) examined the history of metal mining and metal processing in Slovenia and its impact on the environment. Basic information on abandoned, closed (or in closing phase) mining and processing sites was gathered at national level from the documentation of mine archives and scientific/technical publications (e.g. Češmiga, 1959; Mohorič, 1978; Drovenik, M. et al., 1980; Drovenik, F. et al., 1980). The basic information, where available, consisted of the following information: geographical coordinates, type and physico-chemical properties of the mined and processed ore, type and physico-chemical properties of the waste sites from mines and processing sites, raw materials mined, total quantity of ore and raw material mined or processed and environmental impact. As a result, tabular presentations, and maps of abandoned ferrous and non-ferrous metal mines as well as of iron works and metal smelters or hydrometallurgical sites have been produced (Budkovič et al., 2003, 2004). Budkovič et al. (2005) collected existing basic information on abandoned coal mines and mines of non-metallic mineral resources in Slovenia. A more detailed survey of available information on mining waste from the main metal mines and related processing sites was also carried out for the Mežica lead and zinc mine area (Budkovič et al., 2006), for the Idrija mercury and for the Žirovski Vrh uranium mine areas (Gosar et al., 2007) and for the Litija lead, zinc, mercury and baryte mine area (Budkovič et al., 2008). After 2008, a compilation and harmonisation of the collected information (Budkovič et al., 2003, 2004, 2005, 2006, 2008; Gosar et al., 2007) and an additional collection of information on mining waste from smaller and less significant mines (Savske jame, Trebelno, Marija Reka, Lepa njiva, Trojane-Znojile, Škofje, Remšnik, Knapovže and Podljubelj-Sveta Ana), which mostly stopped operating before the Second World War, was carried out to create

gospodarstvo. V tem času podatki o rudarskih odpadkih še niso bili sistematično zbrani v okviru ene organizacije, ampak so bili razpršeni v arhivih rudnikov in v poročilih ter različnih študijah posameznih projektantskih in raziskovalnih organizacij. Poleg tega so bili nekateri podatki podani v knjigah in znanstvenih člankih, tematskih kartah in podobno. Z namenom zbiranja obstoječih informacij o zaprtih in opuščeni odlagališčih rudarskih odpadkov je med leti 2003 in 2013 potekal sistematičen pregled podatkov o zaprtih in opuščeni rudnikih in z njimi povezanih odlagališčih rudarskih odpadkov (Budkovič et al., 2003, 2004, 2005, 2006, 2008; Gosar et al., 2007, 2013a, 2013b). Budkovič in sodelavci (2003, 2004) so proučili zgodovino rudarstva in predelave kovin v Sloveniji ter s temi dejavnostmi povezan vpliv na okolje in stanje v prostoru. Osnovne informacije o opuščeni, zaprtih (ali v fazi zapiranja) rudnikih ter o predelovalnih obratih so bile zbrane na državni ravni iz dokumentacije rudarskih arhivov, znanstvenih in strokovnih publikacij (na primer: Češmiga, 1959; Mohorič, 1978; Drovenik, M. et al., 1980; Drovenik, F. et al., 1980). Osnovne informacije so zajemale naslednje podatke (če so bili dostopni): geografske koordinate, tip in fizikalno-kemijske lastnosti izkopene in predelane rude, tip in fizikalno-kemijske lastnosti jalovine iz rudnikov in predelovalnih obratov, opis izkopene surovine, skupno količino izkopene in predelane rude ter mineralnih surovin in opis morebitnega ugotovljenega vpliva na okolje. Izdelane so bile predstavitev v obliki tabel in slik opuščeni železovih in drugih kovinskih rudnikov ter železarn in topilnic kovin (Budkovič et al., 2003, 2004). Budkovič in sodelavci (2005) so zbrali obstoječe informacije o opuščeni premogovnikih in rudnikih nekovinskih mineralnih surovin v Sloveniji. Za pomembnejše rudnike kovin in z njimi povezane predelovalne obrate je bil izdelan tudi podrobnejši pregled dostopnih podatkov o odlagališčih rudarskih odpadkov in sicer za območja rudnikov svinca in cinka Mežica (Budkovič et al., 2006), živega srebra Idrija in urana Žirovski Vrh (Gosar et al., 2007) ter svinca, cinka, živega srebra in barita Litija (Budkovič et al., 2008). Po letu 2008 so bili na podlagi zbranih podatkov (Budkovič et al., 2003, 2004, 2005, 2006, 2008; Gosar et al., 2007) ter dodatnega pregleda podatkov o rudarskih odpadkih manjših in manj pomembnih rudnikov (Savske jame, Trebelno, Marija Reka, Lepa njiva, Trojane-Znojile, Škofje, Remšnik, Knapovže in Podljubelj-Sveta Ana), ki so v večini prenehali delovati pred drugo svetovno vojno, vzpostavljeni urejeni nizi podatkov o

harmonised data sets of closed and abandoned mines and associated mining waste (Gosar et al., 2013a, b). In addition, to enable the spatial presentation, Google Earth file of existing data was established (Gosar et al., 2013a, b). The basic information on established data sets was preliminarily presented at international conferences (Gosar et al., 2015; Bavec et al., 2017; Miler et al., 2019) and in deliverables (Huisman et al., 2019; Wagner et al., 2018, 2019) of ORAMA (Optimizing quality of information in RAw MAterial data collection across Europe) project, which aimed towards optimisation of quality of information in raw material data collection across Europe.

The objectives of this study were (1) to present the methodology used to collect information on important closed and abandoned mining waste sites and related mines, (2) to summarise and describe the information collected and (3) to establish and share an open access online source of the information collected (in Google Earth file).

Methodology

In this study, only closed (or in closing phase) and abandoned mines, open pits or closed and abandoned mining waste sites are discussed. Therefore, active mining sites or active mining waste sites are not the subject of this study.

As mentioned in the introduction, the main reason for collecting information on closed (or in closing phase) and abandoned mining waste sites was to determine the environmental impact or to define and implement demands of the EU Directive 2006/21/EC or its Slovenian version (Official Gazette, No. 43/08 and 30/11). In order to gather information, it was first necessary to draw up a list of mines and open pits, whose mining waste sites could potentially have serious negative effects on the environment or could become a serious threat to the environment or human health in the medium or short term (list of mines with potential environmental effects in the further text).

Firstly, a working list of all existing active, closed (or in closing phase) and abandoned metal and coal mines as well as non-metallic mineral resource mines and open pits in Slovenia was established. Subsequently, based on the available data on permanent closure of mines and in accordance with the Directive on the management of waste from extractive industries (Directive 2006/21/EC), an inventory of closed (or in closing phase) and abandoned metal and coal mines as well as non-metallic mineral resource mines and open pits in Slovenia was drawn up

zaprtih in opuščeni rudnikih in z njimi povezanih odlagališč rudarskih odpadkov (Gosar et al., 2013a, b). Poleg tega je bila za prostorski prikaz izdelana predstavitev zbranih podatkov v obliki Google Earth datoteke (Gosar et al., 2013a, b). Osnovne informacije o usklajenih nizih podatkov so bile predstavljene na mednarodnih konferencah (Gosar et al., 2015; Bavec et al., 2017; Miler et al., 2019) ter v poročilih (Huisman et al., 2019; Wagner et al., 2018, 2019) projekta ORAMA (Optimizing quality of information in RAw MAterial data collection across Europe), katerega glavni namen je bil optimizacija kvalitete zbiranja podatkov o surovinah v Evropi.

Cilji pričujoče študije so naslednji: (1) predstaviti metodologijo, ki je bila uporabljena za zbiranje informacij o pomembnih zaprtih in opuščeni odlagališč rudarskih odpadkov in z njimi povezanih rudnikov, (2) povzeti in opisati zbrane podatke in (3) vzpostaviti in deliti prosto dostopen spletni vir zbranih informacij (v obliki Google Earth datoteke).

Metodologija

V tej študiji so obravnavani samo zaprti (ali v fazi zapiranja) in opuščeni rudniki, premogovniki, površinski kopi in odlagališča rudarskih odpadkov. Torej aktivni pridobivalni prostori oziroma aktivna odlagališča rudarskih odpadkov niso predmet te študije.

Kot omenjeno v uvodu, je bil glavni razlog za zbiranje podatkov o zaprtih in opuščeni odlagališč rudarskih odpadkov identifikacija vplivov na okolje oziroma vzpostavitev in implementacija zahtev EU Direktive 2006/21/ES oziroma njene slovenske različice (Uradni list RS, št. 43/08 in 30/11). Za zbiranje podatkov je bilo najprej treba pripraviti seznam rudnikov, premogovnikov in površinskih kopov, katerih odlagališča rudarskih odpadkov bi lahko v skladu z Direktivo 2006/21/ES utegnili povzročiti resne škodljive vplive na okolje ali srednjeročno ali kratkoročno postati resna grožnja za zdravje ljudi ali okolje (v nadaljevanju seznam rudnikov z možnim vplivom na okolje).

Sprva je bil izdelan delovni seznam obstoječih aktivnih, zaprtih (ali v fazi zapiranja) in opuščeni rudnikov kovin, premogovnikov in rudnikov ter odprtih kopov nekovinskih mineralnih surovin v Sloveniji. Kasneje je bil na podlagi obstoječih podatkov o dokončnem zaprtju rudnikov in skladno z Uredbo o ravnanju z odpadki iz rudarskih in drugih ekstraktivnih dejavnosti (Direktiva 2006/21/ES) izdelan inventar zaprtih (ali v fazi zapiranja) in opuščeni rudnikov kovin, premogovnikov in

(Gosar et al., 2013a). The latter formed the basis for the compilation of the list of mines with potential environmental impacts, which was drawn up using hierarchical decision-making schemes. Hierarchical decision-making schemes were designed by adapting the existing preliminary risk screening tools that are based on the EU Guidance document (Stanley et al., 2011), which applies the source-transport route-receptor paradigm. In addition, the experience of EU Member States (United Kingdom, Ireland and Hungary), that have already collected national information on mining waste sites, has been taken into account with the intention of drawing up an inventory of sites that are important in terms of environmental impact (Stanley et al., 2009; Kiss et al., 2012; Potter & Johnston, 2012). Decision-making schemes (Tables 1, 2, 3) are based on various criteria relating to three categories: the chemical and physical state of the source, the potential transport pathways for pollutants and receptors of pollutants (Stanley et al., 2011). The criteria are specifically adapted to each type of mineral resource. The categories and criteria must be followed in hierarchical order for the decision-making and final selection of the mines and open pits. The basic principle of decision-making schemes is the selection of mines and open pits, whose mining waste sites have the potential to cause serious negative environmental impacts or may become a serious threat to the environment or human health in the medium or short term. Such mines and open pits were assigned to a so-called 2nd phase (Tables 1, 2 and 3) of the work within the framework of the data collection on mining waste sites.

Following the establishment of a final list of mines with potential environmental impacts (1st phase) using hierarchical decision-making schemes, existing information on mining waste sites was collected and an inventory of these sites was drawn up (2nd phase). As mentioned in the introduction, the process of information gathering included the review of studies and documentation of mines and open pits and archives of research organisations. Other sources including data on mining waste, were also examined. For example, books, scientific articles, thematic maps, and other study materials.

All collected information on closed and abandoned mines and open pits or closed and abandoned mining waste sites was harmonised and stored in STATISTICA software worksheets. Two separate datasets were created. One set contains updated data on closed and abandoned

podzemnih rudnikov ter površinskih kopov nekovinskih mineralnih surovin v Sloveniji (Gosar et al., 2013a). Slednji je predstavljal podlago za pripravo seznama rudnikov z možnim vplivom na okolje, ki je bil pripravljen z uporabo hierarhičnih odločitvenih shem. Hierarhične odločitvene sheme so bile izdelane s prilagoditvijo že obstoječih orodij za preliminarne ocene tveganja v skladu z EU smernicami (Stanley et al., 2011), ki slonijo na paradigmi: vir – transportna pot – prejemnik. Poleg tega so bile upoštevane tudi izkušnje članic EU (Združeno kraljestvo, Irska in Madžarska), ki so z namenom popisa zaprtih odlagališč v tistem času že pripravile seznam pomembnih rudarskih območij v njihovih državah (Stanley et al., 2009; Kiss et al., 2012; Potter & Johnston, 2012). Hierarhične odločitvene sheme (Tabele 1, 2 in 3) slonijo na različnih kriterijih, ki se nanašajo na tri kategorije: kemično in fizično stanje vira, potencialne transportne poti za onesnaževala ter prejemnike onesnaževal (Stanley et al., 2011). Kriteriji so bili posebej prilagojeni vrsti mineralne surovine. Za odločanje in končni izbor rudnikov, premogovnikov in površinskih kopov je treba kategorijam in kriterijem slediti hierarhično. Osnovni princip odločitvenih shem je izbor rudnikov, premogovnikov in površinskih kopov, katerih odlagališča odpadkov bi utegnili povzročiti resne škodljive vplive na okolje in srednjeročno ali kratkoročno postati resna grožnja za zdravje ljudi ali okolje. Tovrstni rudniki, premogovniki in površinski kopovi so bili v sklopu pridobivanja podatkov o njihovih odlagališčih rudarskih odpadkov uvrščeni v t.i. drugo fazo dela (Tabele 1, 2 in 3).

Ko je bil z uporabo hierarhičnih odločitvenih shem pripravljen končni seznam rudnikov z možnim vplivom na okolje (1. faza), sta bila izvedena zbiranje in popis obstoječih informacij o odlagališčih rudarskih odpadkov izbranih rudnikov, premogovnikov in površinskih kopov (2. faza). Kot že omenjeno v uvodu je proces zbiranja informacij vključeval pregled študij in dokumentacije iz arhivov rudnikov, premogovnikov, površinskih kopov ter arhivov različnih raziskovalnih organizacij. Poleg tega smo pregledali še ostale vire, ki vključujejo podatke o rudarskih odpadkih, na primer knjige, znanstvene in strokovne članke, tematske karte in drugo študijsko gradivo.

Vsi zbrani podatki o zaprtih in opuščeni rudnikih, premogovnikih in površinskih kopih oziroma zaprtih in opuščeni odlagališčih rudarskih odpadkov so bili usklajeni in shranjeni v preglednicah programa STATISTICA. Vzpostavljena sta bila dva seta podatkov. En set vsebuje podatke o zaprtih in opuščeni rudnikih, premogovnikih

Table 1. Methodology for selection of closed (or in closing phase) and abandoned metal mines (adapted from Stanley et al., 2011).
Tabela 1. Metodologija za izbor zaprtih (ali v fazi zapiranja) in opušenih rudnikov kovin (prirejeno po Stanley et al., 2011).

Category Kategorija	Criterion Kriterij	Fulfilment of criterion Izpolnjevanje kriterija	Result Rezultat	
1. state of mine stanje rudnika	1. presence of sulphides in the ore or gangue material prisotnost sulfidov v rudi ali jalovini	yes - da no - ne no data - ni podatka	to 2. category - v 2. kategorijo to 2. criterion - k 2. kriteriju to 2. phase - v 2. fazo	
	2. presence of heavy metals (Ag, As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Te, Tl, U, V, Zn) in the produced ore concentrate prisotnost težkih kovin (Ag, As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Te, Tl, U, V, Zn) v proizvedenem rudnem koncentratu	yes - da no - ne no data - ni podatka	to 2. category - v 2. kategorijo to 3. criterion - k 3. kriteriju to 2. phase - v 2. fazo	
	3. use of dangerous chemicals during ore processing uporaba nevarnih kemikalij pri predelavi rude	yes - da no - ne no data - ni podatka	to 2. category - v 2. kategorijo to 4. criterion - k 4. kriteriju to 2. phase - v 2. fazo	
	4. volume of excavated material > 50,000 m ³ (or. descriptive: larger deposit) volumen izkopanega materiala > 50.000 m ³ (oz. opisno: večje rudišče)	yes - da no - ne no data - ni podatka	to 2. category - v 2. kategorijo further handling not needed - nadaljnja obravnava ni potrebna to 2. phase - v 2. fazo	
	5. distance to the nearest water course or water source < 1 km razdalja do najbližjega vodnega toka oz. vodnega vira < 1 km	yes - da no - ne no data - ni podatka	to 3. category - v 3. kategorijo further handling not needed - nadaljnja obravnava ni potrebna to 2. phase - v 2. fazo	
	6. distance to the nearest settlement with > 100 inhabitants < 1 km razdalja do najbližjega naselja z > 100 prebivalci < 1 km	yes - da no - ne no data - ni podatka	in 2. phase - v 2. fazo to 7. criterion - k 7. kriteriju to 2. phase - v 2. fazo	
	7. distance to the area of Natura 2000 < 1 km razdalja do območja Natura 2000 < 1 km	yes - da no - ne no data - ni podatka	to 2. phase - v 2. fazo to 8. criterion - k 8. kriteriju to 2. phase - v 2. fazo	
	8. distance to the nearest pastures and agricultural land < 1 km razdalja do najbližjih pašnikov in kmetijskih površin < 1 km	yes - da no - ne no data - ni podatka	to 2. phase - v 2. fazo further handling not needed - nadaljnja obravnava ni potrebna to 2. phase - v 2. fazo	
	2. transport pathways transportne poti			
	3. pollutant receptors prejemniki onesnaževal			

mines and open pits presented in the report of Gosar et al. (2013a) (1st phase). The other set contains updated data on closed and abandoned mining waste sites presented in the report of Gosar et al. (2013b) (2nd phase).

For the spatial presentation of the data, the data were applied in Google Earth file, of which a working version was presented in the report by Gosar et al. (2014). Within the frame of this study the final version of the file entitled "Inventory on closed (or in closing phase) and abandoned mines, open pits and mining waste sites in

in površinski kopih, ki je bil predstavljen v poročilu Gosar in sodelavci (2013a) (1. faza), drugi set pa vsebuje podatke o njihovih odlagališčih rudarskih odpadkov, ki je bil predstavljen v poročilu Gosar in sodelavci (2013b) (2. faza).

Za prostorski prikaz podatkov so bili podatki prenešeni v Google Earth, katerega delovna verzija je bila predstavljena v poročilu Gosar in sodelavci (2014). Končna verzija datoteke z naslovom Inventar podatkov o zaprtih (ali v fazi zapiranja) in opušenih rudnikih, premogovnikih, površinskih kopih in odlagališčih rudarskih odpadkov v

Table 2. Methodology for selection of closed (or in closing phase) coal mines (adapted from Stanley et al., 2011).

Tabela 2. Metodologija za izbor zaprtih (ali v fazi zapiranja) premogovnikov (prirejeno po Stanley et. al., 2011).

Category Kategorija	Criterion Kriterij	Fulfilment of criterion Izpolnjevanje kriterija	Result Rezultat
1. state of mine stanje rudnika	1. presence of sulphides in the coal or gangue material	yes - da no - ne	to 2. category - v 2. kategorijo to 2. criterion - k 2. kriteriju
	prisotnost sulfidov v premogu ali jalovini	no data - ni podatka	to 2. phase - v 2. fazo
	2. volume of excavated material > 100,000 m ³	yes - da no - ne	to 2. category - v 2. kategorijo further handling not needed - nadaljnja obravnava ni potrebna
	volumen izkopanega materiala > 100.000 m ³	no data - ni podatka	to 2. phase - v 2. fazo
2. transport pathways transportne poti	3. distance to the nearest water course or water source < 1 km	yes - da no - ne	to 3. category - v 3. kategorijo further handling not needed - nadaljnja obravnava ni potrebna
	razdalja do najbližjega vodnega toka oz. vodnega vira < 1 km	no data - ni podatka	to 2. phase - v 2. fazo
	4. distance to the nearest settlement with > 100 inhabitants < 1 km	yes - da no - ne	to 2. phase - v 2. fazo to 5. criterion - k 5. kriteriju
3. pollutant receptors prejemniki onesnaževal	razdalja do najbližjega naselja z > 100 prebivalci < 1 km	no data - ni podatka	to 2. phase - v 2. fazo
	5. distance to the area of Natura 2000 < 1 km	yes - da no - ne	to 2. phase - v 2. fazo to 6. criterion - k 6. kriteriju
	razdalja do območja Natura 2000 < 1 km	no data - ni podatka	to 2. phase - v 2. fazo
	6. distance to the nearest pastures and agricultural land < 1 km	yes - da no - ne	to 2. phase - v 2. fazo further handling not needed - nadaljnja obravnava ni potrebna
	razdalja do najbližjih pašnikov in kmetijskih površin < 1 km	no data - ni podatka	to 2. phase - v 2. fazo

Slovenia" was prepared. It is part of this paper and has [open access](#).

Therefore, when using the information available in Inventory on closed (or in closing phase) and abandoned mines, open pits and mining waste sites in Slovenia, this study should be cited as a source.

At the time of publication of this study, the inventory is only available in Slovenian, but will be translated into English later depending on the financial and human resources available. The information collected has been inserted into a Google Earth format with the use of icon "Add placemark" in Google Earth application, containing names, coordinates (WGS 84) and properties of the mines, open pits, and mining waste sites. For a better overview, the closed and abandoned mines and open pits have been divided into separate folders by mineral resources type and sub-folders by commodity type. The mining waste sites have been divided into separate folders by mineral resources types and sub-folders by metal and coal mine names.

Sloveniji je bila pripravljena v okviru te študije in je [prosto dostopna](#) ter je del predstavljenega članka. Zato je v primeru uporabe informacij, ki so dostopne v Inventarju podatkov o zaprtih (ali v fazi zapiranja) in opuščeni rudnikih, premogovnikih, površinskih kopih in odlagališčih rudarskih odpadkov v Sloveniji, v kakršnekoli namene, potrebno navesti pričujoči članek kot vir.

Inventar je v času objave tega članka dostopen v slovenščini, bo pa v prihodnosti glede na razpoložljiva sredstva preveden tudi v angleščino. Zbrani podatki so bili iz preglednic prenešeni v Google Earth format z uporabo ikone »dodaj prostorsko oznako« v Google Earth aplikaciji, kamor so bili vneseni ime, koordinata (WGS 84) in lastnosti rudnika, premogovnika, površinskega kopa ali odlagališča rudarskih odpadkov. Za lažjo preglednost so bili zaprti (ali v fazi zapiranja) in opuščeni rudniki, premogovniki in površinski kopi razdeljeni v posamezne mape po tipih mineralnih surovin ter v podmape po vrsti surovine. Odlagališča rudarskih odpadkov so bila razdeljena v posamezne mape po tipih mineralnih

Table 3. Methodology for selection of closed (or in closing phase) and abandoned non-metallic mineral resource mines or open pits (adapted from Stanley et al., 2011).

Tabela 3. Metodologija za izbor zaprtih (ali v fazi zapiranja) in opuščenih rudnikov ali površinskih kopov nekovinskih mineralnih surovin (prirejeno po Stanley et. al., 2011).

Category Kategorija	Criterion Kriterij	Fulfilment of criterion Izpolnjevanje kriterija	Result Rezultat
1. state of mine or open pit stanje rudnika ali površinskega kopa	1. volume of excavated material > 50,000 m ³ volumen izkopanega materiala > 50.000 m ³	yes - da	to 2. category - v 2. kategorijo
		no - ne	further handling not needed - nadaljnja obravnava ni potrebna
		no data - ni podatka	to 2. phase - v 2. fazo
2. transport pathways transportne poti	2. distance to the nearest water course or water source < 1 km razdalja do najbližjega vodnega toka oz. vodnega vira < 1 km	yes - da	to 3. category - v 3. kategorijo
		no - ne	further handling not needed - nadaljnja obravnava ni potrebna
		no data -ni podatka	to 2. phase - v 2. fazo
3. pollutant receptors prejemniki onesnaževal	3. distance to the nearest settlement with > 100 inhabitants < 1 km razdalja do najbližjega naselja z > 100 prebivalci < 1 km	yes - da	to 2. phase - v 2. fazo
		no - ne	to 4. criterion - k 4. kriteriju
	4. distance to the area of Natura 2000 < 1 km razdalja do območja Natura 2000 < 1 km	yes - da	to 2. phase - v 2. fazo
		no - ne	to 5. criterion - k 5. kriteriju
	5. distance to the nearest pastures and agricultural land < 1 km razdalja do najbližjih pašnikov in kmetijskih površin < 1 km	yes - da	to 2. phase - v 2. fazo
		no - ne	further handling not needed - nadaljnja obravnava ni potrebna
		no data - ni podatka	to 2. phase - v 2. fazo

Although the data collected has been prepared with care, its accuracy, reliability, completeness, and correctness cannot be fully guaranteed. The data has been compiled from original reports that we have not modified or corrected. They are subject to the usual uncertainties of research and depend on the accuracy and reliability of their sources. Most data, especially older data, were collected without the use of uniform quality assurance standards. Therefore, the paper has an informative character and is not suitable for market decisions or in legal proceedings.

Moreover, part of the information, presented in this paper is already contained in the database "Deposits of Minerals Resources of the Republic of Slovenia – Database of ore deposits", which is maintained by GeoZS for the Ministry of infrastructure, and will be available in the future also in the Mining Registry Book (Internet 1).

surovin in v podmapi po imenih rudnikov oziroma premogovnikov.

Kljub temu, da so zbrani podatki pripravljani zelo skrbno, ni mogoče v celoti zagotoviti njihove točnosti, zanesljivosti, popolnosti in ažurnosti. Podatki so povzeti po izvornih poročilih in jih nismo spreminjali ali popravljali, ter so podvrženi običajni negotovosti raziskav in odvisni od točnosti in zanesljivosti njihovih virov. Večina, predvsem starejših podatkov, je bila zbrana brez uporabe enotnih standardov za zagotavljanje kakovosti. Zato je članek informativne/pregledne narave in ni primeren za tržne odločitve oz. v sodnih postopkih.

Poleg tega je del informacij, ki so predstavljene v tem članku, že zajetih v bazi Nahajališča mineralnih surovin RS – baza rudišč, ki jo upravlja GeoZS za Ministrstvo za infrastrukturo. Predstavljene informacije bodo v prihodnosti na voljo tudi v spletni aplikaciji Rudarska knjiga (Internet 1).

Results

An inventory of closed (or in closing phase) and abandoned metal and coal mines and non-metallic mineral resource mines and open pits in Slovenia (Gosar et al., 2013a) includes 33 metal mines, 43 coal mines, 3 non-metallic mineral resource mines and 48 open pits of non-metallic mineral resources.

The list of closed (or in closing phase) mines with potential environmental impacts (Gosar et al., 2013b), which was prepared with the use of hierarchical decision-making schemes (Tables 1, 2 and 3) revealed 16 metal mines (Table 4) (Škofje-Cerkno, Marija Reka, Idrija, Sv. Ana-Podljubelj, Remšnik, Pleše, Knapovže, Bohor-Ledina, Puharje, Litija, Mežica, Tržišče, Lepa njiva, Trojane-Znojile, Žirovski Vrh and Železno), 6 larger coal mines (Table 5) (Zagorje, Trbovlje-Hrastnik, Laško, Senovo, Kočevje and Kanižarica) and 15 open pit mines of non-metallic mineral resources (limestone, dolomite, flysch, gravel and sand). For all mentioned mines and open pits data on their waste sites were collected and a corresponding inventory was compiled.

The list of closed and abandoned mining waste sites (Gosar et al., 2013b) comprises 156 metal mine waste sites and 18 coal mine waste sites. With regard to non-metallic mineral resource open pits, it turned out that mine residues have already been re-used in open pit rehabilitation or local construction work due to its non-toxic chemical composition. Therefore, there are no closed or abandoned mining waste sites from non-metallic mineral resource open pits in Slovenia. Some mines of non-metallic mineral resources are presented in detail in publications by Dimkovski & Rokavec (2001), Rokavec (2014) and Rokavec & Mezga (2017).

Overview of information on closed and abandoned mining waste sites

The presented information on closed and abandoned mines, open pits and mining waste sites is based on data collected in the reports of Budkovič et al. (2004, 2005, 2006, 2008) and Gosar et al. (2007, 2013a, 2013b) as well as on references listed in these reports.

Mining waste sites of metal mines

A list of closed and abandoned metal mines and related mining waste sites is given in table 4. The mines are ranked from the most important to the least important in terms of the amount of mining waste, generated during the operation of the mine. On about 98 ha of the Slovenian

Rezultati

Izdelali smo inventar zaprtih (ali v fazi zapiranja) in opuščeni rudarskih objektov (Gosar et al., 2013a), ki vključuje: 33 rudnikov kovin, 43 premogovnikov, 3 rudnike nekovinskih mineralnih surovin in 48 površinskih kopov nekovinskih mineralnih surovin.

Seznam zaprtih (ali v fazi zapiranja) in opuščeni rudnikov s potencialnim vplivom na okolje (Gosar et al., 2013b), ki je bil izdelan z uporabo hierarhičnih odločitvenih shem (Tabele 1, 2, 3), vsebuje 16 rudnikov kovin (Tabela 4) (Škofje-Cerkno, Marija Reka, Idrija, Sv. Ana-Podljubelj, Remšnik, Pleše, Knapovže, Bohor-Ledina, Puharje, Litija, Mežica, Tržišče, Lepa njiva, Trojane-Znojile, Žirovski Vrh in Železno), 6 večjih premogovnikov (Tabela 5) (Zagorje, Trbovlje-Hrastnik, Laško, Senovo, Kočevje in Kanižarica) in 15 površinskih kopov nekovinskih mineralnih surovin (apnenec, dolomit, fliš, prod in pesek). Za vse omenjene rudnike, premogovnike in površinske kope sta bila izvedena zbiranje informacij o njihovih odlagališčih odpadkov ter s tem povezana izdelava inventarja.

Seznam zaprtih in opuščeni odlagališč rudarskih odpadkov (Gosar et al., 2013b) vključuje 156 odlagališč rudnikov kovin in 18 odlagališč premogovnikov. Za površinske kope nekovinskih mineralnih surovin se je izkazalo, da so bili rudarski odpadki zaradi nenevarne kemične sestave uporabljeni za sanacijo površinskih kopov ali lokalna gradbena dela. Torej, v Sloveniji ne obstajajo zaprta ali opuščena odlagališča odpadkov iz površinskih kopov nekovinskih mineralnih surovin, zato zanje tudi ne podajamo tabelarničnega pregleda. Nekateri površinski kopi nekovinskih mineralnih surovin so podrobneje predstavljeni v publikacijah Dimkovski & Rokavec (2001), Rokavec (2014) in Rokavec & Mezga (2017).

Pregled informacij o zaprtih in opuščeni odlagališčih rudarskih odpadkov

Predstavljene informacije o zaprtih (ali v fazi zapiranja) in opuščeni rudnikih, premogovnikih, površinskih kopih in odlagališčih rudarskih odpadkov temeljijo na podatkih, zbranih v poročilih Budkovič et al. (2004, 2005, 2006, 2008) in Gosar et al. (2007, 2013a, 2013b) ter virih, navedenih v omenjenih poročilih.

Odlagališča rudarskih odpadkov rudnikov kovin

Seznam zaprtih in opuščeni rudnikov kovin in z njimi povezanih odlagališč rudarskih odpadkov je naveden v tabeli 4. Rudniki so razvrščeni od najbolj do najmanj pomembnih z vidika

Table 4. Summary of closed and abandoned metal mines and associated mining waste (data after Gosar et al., 2013b).

Tabela 4. Pregled zaprtih in opušenih rudnikov kovin in z njimi povezanih rudarskih odpadkov (podatki po Gosar et al., 2013b).

Mine Rudnik	Commodity Surovina	No. of waste sites Št. odlagališč odpadkov	Volume (m ³) Prostornina (m ³)	Area (m ²) Površina (m ²)
Mežica	Pb, Zn (Mo)	33	7,402,500	467,430
Idrija	Hg	14	2,132,700	302,500
Žirovski vrh	U (Th)	2 (+1, in closing phase) 2 (+1, v zapiranju)	1,678,133	130,325
Pleše	Pb, Ba (Zn, Hg)	17	139,900	6,600
Rudnik Litija	Pb, Hg (Sb, Ba, Ag)	28	139,450	37,025
Sveta Ana- Podljubelj	Hg	1	68,000	10,100
Škofje-Cerkno	Cu (Pb, Zn)	8	37,000	15,400
Ledina	Pb, Zn	3	8,300	2,300
Knapovže	Pb, Hg (Zn)	2	5,000	1,600
Trojane-Znojile	Sb	30	4,800	2,400
Marija Reka	Hg (Pb, Ba)	2	1,500	750
Remšnik	Pb (Zn, Cu, Ag)	2	1,500	750
Železno	Pyrite	1	1,000	100
Tržišče	Pb, Zn	3	800	380
Lepa Njiva	Sb	9	750	410
Puharje	Pb, Zn	1	unknown / neznano	unknown / neznano
SUM VSOTA			11,621,333	978,070

territory 11,621,333 m³ of metal mining waste are stored in closed or abandoned waste sites.

In terms of quantities, more than half (64 %) of the mining waste was produced in the Mežica lead and zinc mine, while the other two mines with a significant share of waste produced were the Idrija mercury mine (18 %) and the Žirovski Vrh uranium mine (15 %) (Table 4, fig. 1). The

količine rudarskih odpadkov, ki so nastali med obratovanjem rudnika. Na približno 98 hektarjih slovenskega ozemlja je odloženih 11.621.333 m³ rudarskih odpadkov na zaprtih (ali v fazi zapiranja) ter opušenih odlagališčih.

Glede na prostornino je bila več kot polovica (64 %) rudarskih odpadkov proizvedena v rudniku svinca in cinka Mežica, medtem ko sta preos-

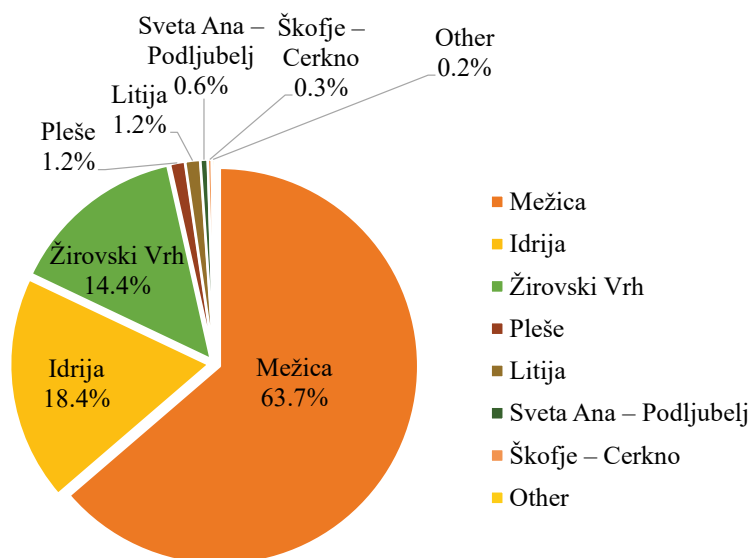


Fig. 1. The portion of mining waste produced by closed or abandoned metal mines.

Sl. 1. Deleži rudarskih odpadkov, ki so bili proizvedeni v danes zaprtih ali opušenih rudnikih kovin.

mines Pleše, Litija and Sveta Ana-Podljubelj each produced up to 1 % of the mining waste in Slovenia, while the remaining smaller mines (Škofje-Cerkno, Ledina, Knapovže, Trojane-Znojile, Marija Reka, Remšnik, Železno, Tržišče, Lepa njava and Puharje) produced negligible amount of waste (less than 1 %) in relation to all metal mines.

Mining waste sites of Mežica lead and zinc mine

Mežica lead and zinc mine was among the most important mines in Slovenia. Mining began already in 1442. The "Mississippi Valley" type ore deposit is hosted by Middle/Upper-Triassic Wetterstein platform carbonates (Drovenik, M. et al., 1980; Kušej, 1992; Lednik, 1994). During entire operation about 1,000,000 tons of Pb and 500,000 tons of Zn were produced. During and after the World War II also Mo was extracted. The ore was mined in different times of operation at several mining districts (Topla, Peca, Naveršnik, Srednja cona, Triurno rudišče, Helena, Moering, Union, Igrčevo, Staro Igrčevo, Fridrih, Stari Fridrih and Graben) (Zorc, 1955). Mežica mine was in closure since 1988 (Official Gazzette, No. 5/88), in 1994 extraction stopped and the mine was closed in 2005 (Senegačnik, 2015).

In the area of Mežica there are 33 mining waste sites, which cover about 47 hectares of land and are located in the areas around the mine tunnels. The total volume of waste from Mežica is estimated at approximately 7,400,000 m³. About two thirds of the total volume (5,000,000 m³) was deposited in Kavšakova halda. Four sites (Štoparjev odval, Žerjavski odval, Glančnik in Fridrih) contain between 160,000 and 720,000 m³ of material. The volume of the others (28 sites in total) is estimated at 600,000 m³. Nineteen waste sites are classified as gangue waste material, 7 as low-grade ore, 4 as separation tailings and 3 as mixed tailings consisting of gangue waste material, separation tailings and slag. For sites classified as low-grade ore, separation tailings or mixed tailings, estimates of average Pb and Zn grades exist in various reports written by mine personal, varying between 0.66 and 3.84 % for Pb and between 0.47 and 7.67 % for Zn (Gosar et al., 2013b & references therein). In addition, it is estimated that 0.012 % of Mo remains in the separation tailings (Zorc, 1955).

tala dva rudnika z znatnim deležem proizvedenih odpadkov rudnik živega srebra Idrija (18 %) in rudnik urana Žirovski Vrh (15 %) (Tabela 4, sl. 1). Rudniki Pleše, Litija in Sveta Ana-Podljubelj so vsak proizvedli do 1 % rudarskih odpadkov v Sloveniji, preostali manjši rudniki (Škofje-Cerkno, Ledina, Knapovže, Trojane-Znojile, Marija Reka, Remšnik, Železno, Tržišče, Lepa njava in Puharje) pa so proizvedli zanemarljivo količino (skupaj manj kot 1 %) odpadkov v primerjavi z vsemi obravnavanimi rudniki kovin.

Odlagališča rudarskih odpadkov rudnika svinca in cinka Mežica

Rudnik svinca in cinka Mežica je bil eden najpomembnejših rudnikov v Sloveniji. Izkopavanje in izkoriščanje rude se je začelo že leta 1442. Rudišče je tipa »Mississippi valley« in se nahaja v srednje/zgornjetriasnih »wettersteinskih« platformnih karbonatih (Drovenik, M. et al., 1980; Kušej, 1992; Lednik, 1994). Med obratovanjem je bilo proizvedenih okoli 1.000.000 ton Pb in 500.000 ton Zn. Med in po 2. svetovni vojni so pridobivali tudi Mo. V različnih obdobjih obratovanja rudnika so rudo kopali na različnih rudnih območjih (Topla, Peca, Naveršnik, Srednja cona, Triurno rudišče, Helena, Moering, Union, Igrčevo, Staro Igrčevo, Fridrih, Stari Fridrih in Graben) (Zorc, 1955). Rudnik Mežica je bil v zapiranjju od leta 1988 (Uradni list SRS, št. 5/88), leta 1994 je bilo ustavljeno pridobivanje, rudnik pa so zaprli leta 2005 (Senegačnik, 2015).

Na območju Mežice je 33 odlagališč rudarskih odpadkov, ki skupno pokrivajo približno 47 hektarjev površine in ležijo v okolici območij rudniških rovov. Skupna prostornina odpadkov v Mežici je ocenjena na približno 7.400.000 m³. Največje odlagališče, Kavšakova halda, zajema 5.000.000 m³, 4 odlagališča (Štoparjev odval, Žerjavski odval, Glančnik in Fridrih) pa med 160.000 in 720.000 m³. Preostalih 28 odlagališč pa skupaj vsebuje približno 600.000 m³. Devetnajst odlagališč je klasificiranih kot jamska jalovina, 7 kot revna ruda, 4 kot separacijska jalovina in 3 kot mešana jalovina, sestavljena iz jamske jalovine, separacijske jalovine in žlindre. Za odlagališča, ki so klasificirana kot revna ruda, separacijska jalovina ali mešana jalovina, so v različnih poročilih iz arhiva rudnika Mežica na voljo tudi ocene preostalih vsebnosti Pb in Zn, ki se gibljejo med 0,66 in 3,84 % za Pb ter med 0,47 in 7,67 % za Zn (Gosar et al., 2013b in tam navedene reference). Poleg tega je ocenjeno, da je v separacijski jalovini tudi Mo s povprečno vsebnostjo 0,012 % (Zorc, 1955).

Mining waste sites of Idrija mercury mine

Another very important metal mine in Slovenia is the Idrija mercury mine. It is a large hydrothermal and monometallic ore deposit (Mlakar, 1974 & references therein; Miklavčič, 1999; Cigale, 2006). The geological structure of the ore deposit is extremely complex and is the result of extensive sedimentary and tectonic occurrences in the Triassic and Tertiary periods (Placer, 1973, Placer & Čar, 1977; Mlakar & Čar, 2009; Čar, 2010). The deposit consists of Carboniferous, Permian, Scythian, Anisian and Ladinian rocks enriched in mercury (Mlakar, 1967). The mineralization occurs in two mineral forms: 70 % as cinnabar (HgS) and 30 % as native mercury. Cinnabar is the main mineral of the ore (Režun & Dizdarevič, 1997). Ore exploitation and production of Hg began as early as in 1492. The Idrija mine was in closure since 1987 (Official Gazette, No. 26/05 – official consolidated text), production was stopped in 1991 and the mine was closed in 2014 (Senegačnik, 2015).

During its operation, the mine produced large quantities of waste, estimated at about 2,100,000 m³. The waste sites are located in various parts of the Idrija town and surroundings, which is a consequence of the complex history of mercury ore processing. The characteristics and spatial distribution of waste sites were described, summarised, and presented by Čar (1992, 1996, personal communication).

In early times (16th and the first half of 17th century) mercury was roasted in piles and in earthen vessels. At that time, smaller primitive roasting sites were located outside the populated area in forests and near rivers, because the energy source (wood and water) was nearby and cooling of ore was possible (Verbič, 1965, 1970 in Čar, 1996). Twenty-one such sites were identified in the rural surroundings of Idrija, where waste material in the form of residues of roasted ore together with pieces of cinnabar-coated clay vessels was found (Gosar & Čar, 2006; Teršič et al., 2011a, Teršič et al., 2011b). However, the exact information about the surface area and amount of waste from historical roasting sites in the forests remains unknown.

The first modernised ore processing plant with permanent furnaces was built in Lejnštat and operated for a short period of time (1605–1620). Later, in 1641, the first covered processing plant was built on the left bank of the Idrijca river at Prejnuta, which was in operation until 1880 (Kavčič, 2008). During the operation of the processing plant in Prejnuta, two dumps (Prejnuta I and Prejnuta-Lipoldi) for depositing roasting

Odlagališča rudarskih odpadkov rudnika živega srebra Idrija

Naslednji zelo pomemben kovinski rudnik v Sloveniji je bil rudnik živega srebra Idrija. Predstavlja veliko monometalno rudišče hidrotermalne nastanka (Mlakar, 1974 in tam navedene reference; Miklavčič, 1999; Cigale, 2006). Geološka zgradba rudišča je izredno kompleksna in je posledica obsežnih sedimentacijskih in tektonskih dogajanj v triasu in terciarju (Placer, 1973; Placer & Čar, 1977; Mlakar & Čar, 2009; Čar, 2010). Rudišče je sestavljeno iz karbonskih, permskih, skitskih, anizijskih in ladinjskih kamnin, orudnih z živim srebrom (Mlakar, 1967). Orudenje se pojavlja v dveh mineralnih oblikah: 70 % kot cinabarit (HgS) in 30 % kot samorodno živo srebro (Režun & Dizdarevič, 1997). Z izkoriščanjem in predelavo Hg rude so pričeli že leta 1492. Rudnik Idrija je bil v zapiranju od leta 1987 (Uradni list RS, št. 26/05 – uradno prečiščeno besedilo), proizvodnjo so ustavili leta 1991, rudnik pa zaprli leta 2014 (Senegačnik, 2015).

Med obratovanjem je rudnik proizvedel veliko količino odpadkov, ki je ocenjena na približno 2.100.000 m³. Odpadki so odloženi na različnih lokacijah Idrije in okolice, kar je posledica pestre zgodovine predelovanja živosrebrove rude. Lastnosti odlagališč odpadkov in njihovo prostorsko razporeditev je opisal, povzel in predstavil Čar (1992, 1996, osebna komunikacija).

V začetku (16. in prva polovica 17. stoletja) so živo srebro žgali v kopah in v lončenih posodah. Takrat so se manjše primitivne žgalnice nahajale izven poseljenega naselja v gozdovih in ob rekah, kjer sta bila vir energije (les) in voda za hlajenje lažje dostopna (Verbič, 1965, 1970 v Čar, 1996). V okolici Idrije je bilo odkritih 21 tovrstnih žgalnic, poleg njih so na teh območjih našli tudi odpadni material v obliki ostankov prežgane rude in delcev glinenih posod, prevlečenih s cinabaritom (Gosar & Čar, 2006; Teršič et al., 2011a, Teršič et al., 2011b). Natančne informacije o površinskem obsegu in količini odpadkov iz starih žgalnic v gozdovih ostajajo neznane.

V Lejnštatju je bil ustanovljen prvi sodobnejši obrat za predelavo rude s stalnimi pečmi, ki je obratoval kratek čas (1605–1620). Kasneje, leta 1641, je bila na levem bregu reke Idrijce pri Prejnuti zgrajena prva pokrita predelovalnica rude, ki je obratovala do leta 1880 (Kavčič, 2008). Med obratovanjem predelovalnice Prejnuta sta nastali dve odlagališči (Prejnuta I in Prejnuta-Lipoldi) žgalniških ostankov (Čar, 1996). Ocenjeno je, da odlagališče Prejnuta-Lipoldi (74.000 m³; 2 ha) vsebuje v povprečju 0,1 % Hg. Med leti 1972 in

residues were created (Čar, 1996). It is estimated that the roasting residues at the Prejnuta-Lipoldi site (74,000 m³; 2 ha) contain on average 0.1 % Hg. In the years 1972-1974 about 16,340 m³ of roasting residues was reprocessed to recover the remaining Hg (Mlakar, 1971; Režun, 1990). Later, during 1986-1988, the waste dump was levelled and the first factory of the present commutator production company Kolektor was built on it (Režun, 1990). The roasting residues of Prejnuta I (34,000 m³; 0.9 ha) consists mainly of the coarse fraction (2-5 cm in diameter) and contain on average 0.144 % Hg. The drill cores produced at the waste site in 1974 showed that it is 3.6 m thick on average. In 1988, 600 m³ of waste material with an average Hg content of 0.224 % was excavated (Režun, 1990; Čar, 1996).

When the processing plant in Prejnuta was closed (1868), a new modern roasting plant was built in Brusovše, which was in operation until 1995 (Kavčič, 2008). During the operation of the processing plant in Brusovše the main waste site called the Dump of a roasting plant RŽŠ Idrija Brusovše (370,000 m³; 4.3 ha) was established next to the processing facility. However, until 1977, most of the roasting residues were deposited along the Idrija river, transported back to the pit or used as filling material for construction works and infrastructure (Čar, 1996).

The waste material, deposited along the Idrija river, had been continuously washed away downstream (Čar, 1996; Gosar et al., 1997; Gosar, 2008). As a result, significant amounts of waste material are stored in downstream overbank sediments and in the Trieste Bay (Adriatic Sea). After 1983, for ecological reasons, it was no longer permitted to dump the waste in the Idrija river. Therefore, the waste dump of Brusovše plant on the right bank of the Idrija river became larger. However, due to poor management, the material was continuously washed away at high water levels. On the southern part of the dump a new factory of company Kolektor was built and restoration work was carried out (the dump was partially covered with asphalt) (Gosar et al., 2007).

The waste material, which was used to level the surface during the urbanisation of the town, was described by Čar (1996). The waste sites of these materials have been named after the places, where they were deposited (Gosar et al., 2007). The composition of the waste materials is diverse. The waste site Arkova ulica (830,000 m³; 6 ha) consists of roasting residues, site Za gradom (6,500 m³; 0.2 ha) of residues of roasted ore-bearing clastic rocks sites Beblerjeva ulica (28,000 m³; 0.7 ha),

1974 so za pridobitev Hg, ki je ostal v odloženih žgalniških ostankih, ponovno predelali okoli 16.340 m³ materiala. (Mlakar, 1971; Režun, 1990). Kasneje, med leti 1986 in 1988, so odlagališče izravnali in na njegovem območju postavili prvo tovarno sedanjega podjetja Kolektor (Režun, 1990). Žgalniški ostanki iz odlagališča Prejnuta I (34.000 m³; 0,9 ha) so v večji meri sestavljeni iz debelozrnate frakcije (premer 2–5 cm) in v povprečju vsebujejo 0,144 % Hg. Raziskave vrtin iz leta 1974 so pokazale, da je odlagališče v povprečju debelo 3,6 m. Leta 1988 je bilo iz odlagališča izkopanega 600 m³ materiala s povprečno vsebnostjo Hg 0,224 % (Režun, 1990; Čar, 1996).

Ob zaprtju predelovalnega obrata Prejnuta (1868) je bila v Brusovšah zgrajena nova sodobna žgalnica, ki je obratovala do leta 1995 (Kavčič, 2008). Med obratovanjem žgalnice Brusovše je bilo ob njej urejeno glavno odlagališče z imenom Odlagališče žgalnice RŽŠ Idrija Brusovše (370.000 m³; 4,3 ha). Kljub temu pa so do leta 1977 večino žgalniških ostankov odvrkli vzdolž reke Idrijce, jih transportirali nazaj v rudniške rove ali pa uporabili kot polnilni material za infrastrukturne objekte in druga gradbena dela (Čar, 1996).

Odpadni materiali, ki so jih odvrkli vzdolž reke Idrijce, so se nenehno spirali v smeri njenega toka (Čar, 1996; Gosar et al., 1997; Gosar, 2008). Posledično je veliko odpadnega materiala odloženega in razpršenega dolvodno v poplavnih ravninah ter v Tržaškem zalivu v Jadranskem morju. Leta 1983 zaradi ekoloških razlogov odlaganje odpadkov v Idrijco ni bilo več dovoljeno. Posledično se je glavno odlagališče Brusovše na desnem bregu reke Idrijce povečalo. Zaradi nezadostnega utrjevanja brežin odlagališča se je ob visokih vodah material še vedno izpiral v reko. Na južnem delu odlagališča je bila zgrajena nova tovarna podjetja Kolektor ter izvedena sanacija (odlagališče je bilo delno prekrito z asfaltom) (Gosar et al., 2007).

Sestavo odpadnega materiala, ki so ga uporabili za izravnavo površin pri urbanizaciji mesta, je opisal Čar (1996). Odlagališča teh materialov so bila poimenovana po krajih, kjer so odloženi (Gosar et al., 2007). Sestava odlagališč je raznolika. Odlagališče Arkova ulica (830.000 m³; 6 ha) sestavljajo žgalniški ostanki, Za gradom (6.500 m³; 0,2 ha) ostanki žganih orudnih klastičnih kamnin, Beblerjeva ulica (28.000 m³; 0,7 ha), VVO Muzej (1.500 m³; 0,2 ha), Ulica H. Freyerya (8.000 m³; 0,3 ha) in Lejnštaj (190.000 m³; 3,1 ha) ostanki žganih orudnih klastičnih in karbonatnih kamnin, in nazadnje

VVO Muzej (1,500 m³; 0.2 ha), Ulica H. Freyerya (8,000 m³; 0.3 ha) and Lejnštat (190,000 m³; 3.1 ha) of residues of roasted ore bearing clastic rocks and carbonates, and lastly Mejca (120,000 m³; 2.3 ha) and Mercator (50,000 m³; 1.2 ha) of residues of roasted ore-bearing clastic rocks and carbonates mixed with Idrija river sediments.

In the place Trg Svetega Ahacija, where today's town square is located, low-grade ore (mainly ore bearing clastic and carbonate rocks) was deposited during the first century of Hg mining. The volume is estimated at 160,000 m³, the surface area at 2.8 hectares, and thickness at 3 m. It is also estimated that the low-grade ore contains about 80 tons of Hg (Čar, 1996). In addition, at Vodnikova ulica (40,000 m³; 1 hectare) there is a dump of residues of roasted ore-bearing clastic rocks and carbonates, which are assumed to have been deposited before 1652, as traces of ore processing in clay vessels were found (Čar, 1996).

*Mining waste sites of Žirovski Vrh
uranium mine*

Slovenia has significant deposits of uranium ore at Žirovski Vrh. The ore-bearing rocks are grey Gröden (Val Gardena) sandstone of the Middle Permian age. Its basement is represented by dark Carbonian-Permian shale, while it is overlaid by Middle Permian red Gröden sandstone and Upper Permian limestone and dolomite (Jokanović et al., 1972; Drovenik, M. et al., 1980; Drovenik, F. et al., 1980). Uranium ore in Žirovski Vrh was discovered in 1960. After that, research and trial exploitation began, which lasted until 1980. After 1980, the mine flourished and was in operation until 1990, when the mine ceased its regular operation, because uranium production was no longer economically competitive and for environmental reasons related to the Chernobyl accident in 1986.

Approximately 452 tons of ore concentrate U₃O₈ was extracted from 630,000 tons of ore during the entire operation (Florjančič et al., 2000; Florjančič, 2006). The average content of U₃O₈ in the ore was about 715 g U₃O₈/t. In order to achieve the final closure of the mine, the Republic of Slovenia accepted a Permanent Cessation of the Uranium Ore Exploitation and Prevention of Effects of Mining at the Žirovski Vrh Uranium Mine Act (Official Gazzette, No. 22/06). In order to carry out the decommissioning and restoration of the mining and ore processing sites, the Slovenian Government established the public enterprise Rudnik Žirovski Vrh, javno podjetje za zapiranje rudnika urana (RŽV) and provided the necessary financial resources (Internet 2).

odlagališči Mejca (120.000 m³; 2,3 ha) ter Mercator (50.000 m³; 1,2 ha) ostanki žganih orudnih klastičnih in karbonatnih kamnin pomešanih s sedimenti reke Idrije.

Na lokaciji Trg Svetega Ahacija, kjer se danes nahaja Mestni trg, so v prvem stoletju pridobivanja živega srebra odlagali odvale revne rude (v glavnem rudonosne klastite in karbonate), katerih ocenjena prostornina znaša 160.000 m³, površina 2,8 hektarjev, debelina pa 3 m. Ocenjeno je tudi, da odložena revna ruda vsebuje okoli 80 ton Hg (Čar, 1996). Poleg tega, obstaja še odlagališče Vodnikova ulica (40.000 m³; 1 ha), ki ga sestavljajo ostanki žganih orudnih klastičnih in karbonatnih kamnin. Predvideva se, da je bil material odložen pred letom 1652, saj so bile tam najdene sledi predelovanja rude v glinenih posodah (Čar, 1996).

*Odlagališča rudarskih odpadkov rudnika
urana Žirovski Vrh*

Slovenija ima pomembna nahajališča uranove rude v Žirovskem Vrhu. Orudene kamnine sestavljajo grödenski peščenjaki srednjeperske starosti. Podlago predstavljajo temni karbonsko-permski skrila, ki so prekriti s srednjeperskimi rdečimi grödenskimi peščenjaki in zgor-njeperskimi apnenci in dolomiti (Jokanović et al., 1972; Drovenik, M. et al., 1980; Drovenik, F. et al., 1980). Orudenje z uranom je bilo na Žirovskem Vrhu ugotovljeno leta 1960. Kmalu potem se je začelo širše raziskovanje in odpiralno rudarjenje, ki je trajalo do leta 1980. Po letu 1980 je rudnik doživel razcvet in deloval do leta 1990, ko se je proizvodnja ustavila, ker je njena ekonomska upravičenost nenadoma padla (padec svetovnih cen) in zaradi intenzivnega nastopa »zelenega« političnega gibanja, tesno povezanega tudi s takratno nesrečo v Černobilu leta 1986.

Kot navaja Florjančič in sodelavci (2000; Florjančič 2006) je bilo med celotnim obratovanjem rudnika proizvedenih 450 ton rudnega koncentrata U₃O₈ iz 630.000 ton rude. Povprečna vsebnost U₃O₈ v rudi je torej znašala povprečno okoli 715 g U₃O₈/t rude. Z namenom trajnega zaprtja rudnika je država leta 1992 sprejela Zakon o trajnem prenehanju izkoriščanja uranove rude in preprečevanju posledic rudarjenja v Rudniku urana Žirovski Vrh (ZTPIU) (Uradni list RS, št. 22/06 – uradno prečiščeno besedilo). Z namenom izvedbe razrešitve in sanacije rudarskega in predelovalnega območja je vlada ustanovila družbo Rudnik Žirovski Vrh, javno podjetje za zapiranje rudnika urana (RŽV) in prispevala potrebna finančna sredstva (Internet 2).

At Žirovski Vrh mine three mining waste dumps cover about 13 hectares of land. It should be noted that only two of them (Jazbec and DP-10) are closed. The third one (Boršt) is still in the closing phase due to specific stability issues and the high degree of difficulty of closing works (Sivac et al., 2018). The existing information on the mining waste sites of Žirovski Vrh was collected in a common database in 2013 (Gosar et al., 2013b) and updated with the latest information (Internet 3) during the preparation of this paper.

The waste site Boršt (415,543 m³; 4.2 ha) consists of hydrometallurgical tailings, gangue materials and contaminated materials. Hydrometallurgical tailings were dumped between 1984 and 1990, gangue materials between 1984 and 2004 and contaminated materials in 2009 (Internet 3). It is estimated that the hydrometallurgical tailings (610,000 tons) contain ²³⁰Th (600 Bq/kg), ²³⁸U (10,000 Bq/kg) and ²²⁶Ra (8,700 Bq/kg). In the gangue materials (111,000 tons) the average content 17.8 g of U₃O₈ per ton is estimated. The deposit also contains residuals of soluble inorganic salts NH₄SO₄ and emanations of Rn (Petkovšek et al., 2005). The remediation of Boršt was completed in 2010, however further measures are being taken due to landslide movements of the waste material (Internet 3).

The waste site Jazbec (1,198,900 m³; 6.7 ha) consists of waste rock, low-grade ore, red mud from the hydrometallurgical process of uranium leaching, filter cake from the mine water treatment station, contaminated soil and polluted material from the uranium ore processing facilities, ruins of buildings and technological equipment from the uranium ore processing plant. Waste rock, low-grade ore and red mud were deposited between 1982 and 1990 and material from decontamination and demolition between 1991 and 2007 (Internet 3). The residual content of U₃O₈ in the waste rock (1,366,589 tons) and in the low-grade ore (126,000 tons) was estimated at 69 g/t, while in the red mud (48,000 tons) 62,000 Bq/kg of ²³⁰Th, 500 Bq/kg of ²³⁸U and 200 Bq/kg of ²²⁶Ra remained (Jelen, 2004; Internet 3). The remediation of Jazbec was completed in 2008, and since 2013 Jazbec has been a national infrastructure facility. Once it was proven that the remediation was successful, the Jazbec waste site was closed in 2015 (Internet 3).

The waste site DP-10 (63,690 m³; 2.1 ha) consists of gangue materials. The residual content of U₃O₈ in the waste is estimated at 28 g/t. The material was dumped between 1966 and 1980. The site was restored during the construction of the mine plant between 1980 and 1985. The restoration

V okolici rudnika Žirovski Vrh so 3 odlagališča rudarskih odpadkov, ki pokrivajo 13 ha območja. Opozoriti je treba, da sta zaprti le 2 odlagališči (Jazbec in DP-10). Odlagališče Boršt je še vedno v fazi zapiranja zaradi specifičnih problemov s stabilnostjo in visoke stopnje težavnosti zapiralnih del (Sivac et al., 2018). Obstoječe informacije o rudarskih odpadkih rudnika Žirovski Vrh so bile zbrane v skupno bazo leta 2013 (Gosar et al., 2013b) in dopolnjene z najnovejšimi podatki (Internet 3) tekom priprave te študije.

Odlagališče Boršt (415.543 m³; 4,2 ha) sestavljajo hidrometalurška jalovina, jamska jalovina, in onesnaženi materiali. Hidrometalurško jalovino so odlagali med leti 1984 in 1990, jamsko jalovino med 1984 in 2004 in onesnažene materiale leta 2009 (Internet 3). Ocenjeno je, da hidrometalurška jalovina (610.000 ton) še vedno vsebuje ²³⁰Th (600 Bq/kg), ²³⁸U (10.000 Bq/kg) in ²²⁶Ra (8.700 Bq/kg) ter da se v jamski jalovini (111.000 ton) nahajajo ostanki U₃O₈ (s povprečno vsebnostjo 17,8 g U₃O₈/t jalovine). V materialu odlagališča Boršt se nahajajo tudi ostanki topnih anorganskih soli NH₄SO₄ in emanacij Rn (Petkovšek et al., 2005). Sanacija odlagališča je bila končana leta 2010, vendar se še vedno izvajajo nadaljnji ukrepi zaradi plazenja odloženega materiala (Internet 3).

Odlagališče Jazbec (1.198.900 m³; 6,7 ha) sestavljajo jamska jalovina, revna ruda, rdeče blato iz hidrometalurških procesov izluževanja uranove rude, filtrirna pogača iz čistilne naprave rudniških vod, onesnažena zemljina iz predelovalnih naprav urana, ruševin in tehnološke opreme predelovalnega obrata. Jamsko jalovino, revno rudo in rdeče blato so odlagali med leti 1982 in 1990, material iz dekontaminacije in rušenja pa med leti 1991 in 2007 (Internet 3). Ocenjeno je, da jamska jalovina (1.366.589 ton) in revna ruda (126.000 ton) vsebujeta 69 g U₃O₈/t jalovine, rdeče blato (48.000 ton) pa 62.000 Bq/kg ²³⁰Th, 500 Bq/kg ²³⁸U in 200 Bq/kg ²²⁶Ra (Jelen, 2004; Internet 3). Sanacija odlagališča je bila končana leta 2008. Od leta 2013 odlagališče spada pod državno infrastrukturo. Odlagališče Jazbec je bilo zaprto leta 2015, po tem, ko je bilo ugotovljeno, da je bila sanacija uspešna (Internet 3).

Odlagališče DP-10 (63.690 m³; 2,1 ha) sestavlja jamska jalovina, ki po ocenah vsebuje 28 g U₃O₈/t jalovine. Material je bil odložen med leti 1966 in 1980. Odlagališče je bilo obnovljeno med gradnjo rudarskega objekta med leti 1980 in 1985. Obnova je obsegala prekrivanje odpadkov z 0,5 m inertnega materiala (Rudnik Žirovski Vrh & IBE d.d., 1997). Odlagališče P-10 spada v območje objekta

consisted in covering of the waste with 0.5 m of inert material (Rudnik Žirovski Vrh & IBE d.d., 1997). The P-10 belongs to the area of the national infrastructure facility of the Jazbec waste site (Internet 4).

Mining waste sites from other metal mines

In Podsitarjevec near Litija, a large polymetallic Pb, Zn, Hg, Ba and Ag ore deposits are found in Carbonian-Permian clastic rocks. Mining began already in Roman times. The Litija mine was in intensive operation between 1875 and 1966 and had its own processing plant. Approximately 50,000 tons of Pb, 32,000 tons of baryte BaSO_4 , 158 tons of Hg and 9.8 tons of Ag were extracted from domestic and imported ore (Fabjančič, 1972; Drovenik, M. et al., 1980; Mlakar, 1994). According to the documentation "Fond Litija" from the archives of the Mežica mine, in the years 1880 and 1960 at the site Podsitarjevec (54,700 m³; 1.2 ha) waste rock, low-grade ore and separation tailings were dumped while at 5 smaller dumps (10,000 to 15,000 m³) waste rock and low-grade ore. It is estimated that on average 1.86 % of Pb and 0.47 % of Zn remained in the waste material at dump site Podsitarjevec. Between 1961 and 1965 flotation tailings were dumped at the site Pregrada (20,000 m³; 0.8 ha). In the vicinity there are also small dumps (less than 1,000 m³) of gangue materials and low-grade ore from the early phase of operation (between the 18th century and the first half of the 20th century) (Mlakar, 1994).

In the vicinity of Pleše (Škofljica) there is a small vein type ore deposit of Pb and Ba and subordinate Zn and Hg is hosted by Carboniferous-Permian clastic rocks (Drovenik, M. et al. 1980; Mlakar, 2003). It has been estimated that Pb ore mining have started before at least 300 years (Mlakar, 2003). Mining of baryte began after the First World War. The mine was in operation until 1963. During the entire mining operation, waste material was deposited in some small dumps (less than 5,000 m³) and two large waste dumps Pleše Čelo 10 (64,000 m³; 0.4 ha) and Pleše Čelo 9 (46,000 m³; 0.2 ha). All waste consists of gangue material and low-grade ore. It is estimated that about 30 % of the baryte content remains in the waste (Tiringer & Berce 1956 in Mlakar, 2003).

At Sveta Ana-Podljubelj, a vein type Hg ore deposit is hosted by Middle Triassic dolomitised limestone (Dimkovski, 1972; Drovenik, M. et al., 1980; Drovenik, F. et al., 1980). According to the historical data mining began in 1557 and lasted until 1902, with some pauses in between. A detailed historical overview of the mining is

državne infrastrukture odlagališča rudarske jalovine Jazbec (Internet 4).

Odlagališča rudarskih odpadkov preostalih rudnikov kovin

V Podsitarjevcu v bližini Litije se v karbonsko-permskih klastičnih kamninah nahaja veliko polimetalno Pb, Zn, Hg, Ba in Ag rudišče. Rudarstvo se je začelo že v rimskih časih. Rudnik Litija je obratoval intenzivno med leti 1875 in 1966 ter je imel lasten predelovalni obrat. V času obratovanja so iz domače in od drugod pripeljane rude pridelali okoli 50.000 ton Pb, 32.000 ton barita (BaSO_4), 158 ton Hg in 9,8 ton Ag (Fabjančič, 1972; Drovenik, M. et al., 1980; Mlakar, 1994). Glede na dokumentacijo »Fond Litija« iz arhiva rudnika Mežica, so bile med leti 1880 in 1960 na odlagališče Podsitarjevec (54.700 m³; 1,2 ha) odložene jamska jalovina, revna ruda in separacijska jalovina ter na 5 manjših odlagališč (10.000 do 15.000 m³) jamska jalovina in revna ruda. Ocenjeno je, da je v odpadnem materialu odlagališča Podsitarjevec povprečno 1,86 % Pb in 0,47 % Zn. Med leti 1961 in 1965 je bila flotacijska jalovina odložena na odlagališče Pregrada (20.000 m³; 0,8 ha). V okolici so tudi manjša odlagališča (manj kot 1.000 m³) jamske jalovine in revne rude iz začetnega obdobja delovanja rudnika (med 18. stoletjem ter do prve polovice 20. stoletja) (Mlakar, 1994).

Na Plešah (Škofljica) se v karbonsko-permskih oziroma zgornjekarbonskih klastičnih kamninah in skitijskem dolomitu nahaja manjše rudišče Pb in Ba, ter podrejeno Zn in Hg (Drovenik, M. et al., 1980; Mlakar, 2003). Izkopavanje svinčeve rude se je po nekaterih ocenah začelo pred vsaj 300 leti (Mlakar, 2003). Izkopavanje barita se je začelo po prvi svetovni vojni. Rudnik je obratoval do leta 1963. Med obratovanjem rudnika so v bližini rudnika odložili material v več majhnih odlagališčih (manj kot 5.000 m³) ter v dveh večjih odlagališčih Pleše Čelo 10 (64.000 m³; 0,4 ha) in Pleše Čelo 9 (46.000 m³; 0,2 ha). Ves odpadni material sestavljata jamska jalovina in revna ruda. Ocenjeno je, da v odpadnem materialu ostaja približno 30 % barita (Tiringer & Berce 1956 v Mlakar, 2003).

V Sveti Ani-Podljubelju je v anizijskem (srednjetriasnem) dolomitiziranem apnencu žilno Hg rudišče (Dimkovski, 1972; Drovenik, M. et al., 1980; Drovenik, F. et al., 1980). Po zgodovinskih podatkih začetki izkoriščanja rude segajo v leto 1557. Rudarjenje s prekinitvami je potekalo vse do leta 1902. Podrobnejši zgodovinski pregled izkoriščanja rude je predstavljen v monografiji Teršič in sodelavci (2006). Med obratovanjem

given in the monograph by Teršič and co-workers (2006). During the entire operation of the mine, 68,000 m³ of gangue material, low-grade ore and primary roasting residues were dumped on nearby land covering 1 hectare (Mohorič, 1957).

In Škofje-Cerkno Cu-ore was mined, which occurs in the cement of the sandstone of the upper part of the Val Gardena clastic sedimentary rocks (Drovenik, F. et al., 1967; Drovenik, M. et al., 1980; Drovenik, F. et al., 1980). The copper mine was in operation for a very short period between 1940 and 1943. Therefore, all waste dumps are small (between 400 and 12,000 of m³) and cover a total of 1.5 hectares of land. The waste material is composed of gangue material and low-grade ore (Drovenik, F. et al., 1967).

At Stranje above Bohor there is a small vein type ore deposit (Pb and Zn) in the Triassic dolomite and was exploited by the Ledina mine (Češmiga, 1959; Drovenik, M. et al., 1980; Drovenik, F. et al., 1980). The beginning of the mining operation is unknown. The exploitation of the deposit lasted until the end of the 19th century and the associated mining waste was dumped at three small sites (containing less than 5,000 m³ of material) on a total area of 0.2 hectares. Two waste sites consist of gangue material mixed with flotation tailings, while one contains only gangue material (Teran, 2011).

In Knapovže mine (near Trnovec), vein type ore deposits enriched with Pb, Hg and Zn are hosted by Carboniferous-Permian clastic rocks, which were exploited between 14th century and 1872 (Mlakar, 1979; Drovenik, M. et al., 1980; Drovenik, F. et al., 1980; Trajanova & Žorž, 2013). Mining operations were stopped because the mine was flooded during a heavy rainstorm. Between 1929 and 1934, exploration of the mine was carried out, which revealed that ore deposits still contained significant ore reserves. Near the mine, there are two small (less than 4,000 m³) dumps of gangue material mixed with flotation tailings, covering an area of about 0.2 hectares (Mlakar, 1979).

At Marija Reka, vein type Pb and Hg ore deposit is hosted by Carboniferous-Permian clastic rocks (Češmiga, 1959; Drovenik, M. et al., 1980; Drovenik, F. et al., 1980; Mlakar, 1982a). The beginning of ore exploitation began in the 18th century and lasted until 1932. The mine established two small (less than 1,000 m³) dumps of gangue material and low-grade ore, covering a total of 0.07 hectares (Mlakar, 1982a).

In Remšnik is small vein type (Pb and subordinately Zn, Cu and Ag) ore deposit is hosted

rudnika je bilo na bližnjem 1 hektarju ozemlja odloženih 68.000 m³ jamske jalovine, revne rude in primarnih žgalniških ostankov (Mohorič, 1957).

V Škofje-Cerknem so izkoriščali Cu rudo, ki se pojavlja v cementu peščenjakov v zgornjem delu klastičnih sedimentnih kamnin permske Grödenske (Val Gardena) formacije (Drovenik, F. et al., 1967; Drovenik, M. et al. 1980; Drovenik, F. et al., 1980). Rudnik bakra je deloval v zelo kratkem obdobju med leti 1940 in 1943. Zaradi tega so vsa odlagališča zelo majhna (med 400 in 12.000 m³) in pokrivajo skupno 1,5 hektarja površine. Odpadni material sestavljajo jamska jalovina in revna ruda (Drovenik, F. et al., 1967).

V Stranju nad Bohorjem se v triasnem dolomitu nahaja manjše žilno rudišče Pb in Zn, kjer je obratoval rudnik Ledina (Češmiga, 1959; Drovenik, M. et al., 1980; Drovenik, F. et al., 1980). Začetek rudarske dejavnosti ni znan. Izkopavanje rude je trajalo do konca 19. stoletja. V tem času so nastala 3 manjša odlagališča rudarskih odpadkov, ki vsebujejo manj kot 5.000 m³ materiala na skupno 0,2 ha površine. Na dveh odlagališčih sta odloženi jamska in flotacijska jalovina, na enem pa samo jamska jalovina (Teran, 2011).

Pri Trnovcu v rudniku Knapovže so v obdobju med 14. stoletjem in vse do leta 1872 izkoriščali žilna rudišča, obogatena s Pb, Hg in Zn, ki se pojavljajo v karbonsko-permskih klastičnih kamninah (Mlakar, 1979; Drovenik, M. et al., 1980; Drovenik, F. et al., 1980; Trajanova & Žorž, 2013). Dela v rudniku so se ustavila zaradi poplavitve rudnika med močnim deževjem. Kasneje, med leti 1929 in 1934, so bile izvedene dodatne raziskave, ki so pokazale, da so v rudišču še vedno znatne zaloge rude. V bližini rudnika sta dve manjši (manj kot 4.000 m³) odlagališči jamske in flotacijske jalovine, ki pokrivata približno 0,2 hektarja površine (Mlakar, 1979).

V karbonsko-permskih klastičnih kamninah so tudi žilna orudjenja s Pb in Hg v Marija Reki (Češmiga, 1959; Drovenik, M. et al., 1980; Drovenik, F. et al., 1980; Mlakar, 1982a). Izkoriščanje rude se je začelo v 18. stoletju in je trajalo do leta 1932. Zaradi rudarjenja sta nastali dve manjši (manj kot 1.000 m³) odlagališči jamske jalovine in revne rude, ki skupno pokrivata 0,07 hektarja površine (Mlakar, 1982a).

Na Remšniku pod Kozjakom vzhodno od Radelj ob Dravi je v metamorfnih kamninah (gnajs in amfibolit) manjše žilno rudišče Pb ter podrejeno Zn, Cu in Ag (Drovenik, M. et al., 1980; Drovenik, F. et al., 1980). Rudnik Remšnik je deloval med leti 1850 in 1892 ter v tem času proizvedel približno

by metamorphic rocks (gneiss and amphibolite) (Drovenik, M. et al., 1980; Drovenik, F. et al., 1980). The Remšnik mine was in operation between 1850 and 1892 and produced about 48 tons of Pb and 75 tons of Ag. Two small (less than 1,000 m³) dumps of gangue material and low-grade ore were created near the mine, covering a total area of 0.07 hectares (Žorž & Moser, 2002).

In Železno-Pirešica a small vein type pyrite ore is hosted by andesite. The mining in Železno pyrite mine began in 1871 on demand from the chemical industry. It is not known how long the mining lasted. Near the mine there is a small (1,000 m³; 0.01 ha) dump of gangue material and low-grade ore (Ciglar, 1962).

In Sevnica, a small vein type Pb and Zn ore deposit, which is hosted by Triassic carbonates, was exploited between 1874 and 1884 by Tržišče mine (Iskra, 1964). During the operation of the mine, 3 extremely small dumps (from 50 to 500 m³) of gangue material and low-grade ore were created on a total area of 0.04 hectares (Testa & Zupančič, 1942; Iskra, 1964).

In Lepa njiva, between 19th century and 1902, a small vein type antimony-containing ore deposit hosted by silicified carbonate rocks was exploited (Mlakar, 1990). During the operation, 9 extremely small dumps (from 50 to 200 m³) of gangue material and low-grade ore were created on an area of 0.04 hectares (Mlakar, 1990).

There is another small vein type antimony containing ore deposit hosted in Carbonian-Permian clastic rocks. The ore deposit was exploited by the Trojane-Znojile mine between 17th century and 1941 (Drovenik, M. et al., 1980; Drovenik, F. et al., 1980; Mlakar, 1982b). During the operation of the mine, gangue material and low-grade ore were deposited in 30 extremely small dumps (with 100 to 400 m³ of waste material) on a total area of 0.2 hectares (Mlakar, 1982b; Teršič et al., 2018).

In Skorno (Šoštanj), a small Pb and Zn deposit is hosted by Upper Permian limestones and dolomites, which was exploited by the Puharje mine as early as the 17th century. The mine was renovated in 1856 and shut down at the end of the 19th century (Iskra, 1969; Iskra et al., 1974; Drovenik, F. et al., 1975). It is assumed that there are dumps of ore waste in the vicinity, although the volume and locations are unknown. However, in 2018, a borehole drilling project was carried in the Puharje mining area as part of the EU Innolog project, which revealed that the first 15 meters of drill core was composed of old ore waste from previous exploration/exploitation activities (Teran et al., 2018).

48 ton Pb in 75 ton Ag. V bližini rudnika sta dve manjši (manj kot 1.000 m³) odlagališči jamske jalovine in revne rude na skupno 0,07 hektarja površine (Žorž & Moser, 2002).

Pri Pirešici je v andezitu manjše žilno rudišče pirita, imenovano Železno. Rudarjenje se je tam začelo leta 1871 na pobudo kemične industrije. Ni znano kako dolgo je rudarjenje potekalo. Jamska jalovina in revna ruda sta bili odloženi na manjše odlagališče (1.000 m³; 0,01 ha) (Ciglar, 1962).

Pri Sevnici je v triasnih karbonatih manjše žilno rudišče Pb in Zn, ki so ga izkoriščali med leti 1874 in 1884 v rudniku Tržišče (Iskra, 1964). Med delovanjem so nastala 3 zelo majhna (od 50 do 500 m³) odlagališča jamske jalovine in revne rude, ki obsegajo skupno 0,04 hektarja površine (Testa & Zupančič, 1942; Iskra, 1964).

Lepa njiva je manjše žilno rudišče antimonove rude v silificiranih karbonatnih kamninah. Rudo so izkoriščali v 19. stoletju, do leta 1902 (Mlakar, 1990). Med delovanjem rudnika sta bili jamska jalovina in revna ruda odloženi na 9 zelo majhnih odlagališčih (od 50 do 200 m³), ki obsegajo skupno 0,04 hektarja površine (Mlakar, 1990).

V karbonsko-permskih klastičnih kamninah še eno manjše žilno rudišče antimonove rude, ki so ga izkoriščali od 17. stoletja naprej do leta 1941 v rudniku Trojane-Znojile (Drovenik, M. et al., 1980; Drovenik, F. et al., 1980; Mlakar, 1982b). Med delovanjem rudnika je nastalo 30 zelo majhnih odlagališč (vsebujejo od 100 do 400 m³ odpadnega materiala) jamske jalovine in revne rude, ki obsegajo skupno 0,2 hektarja površine (Mlakar, 1982b; Teršič et al., 2018).

V Skornem pri Šoštanju se v zgornjepermskih apnencih in dolomitih nahaja manjše rudišče Pb in Zn, kjer so se v 17. stoletju začela dela v rudniku Puharje. Rudnik je bil obnovljen leta 1856 in je prenehal z delovanjem konec 19. stoletja (Iskra, 1969; Iskra et al., 1974; Drovenik, F. et al., 1975). Domnevno je v okolici rudnika več odlagališč rudarskih odpadkov, vendar njihove prostornine in lokacije nisto znane. V okviru projekta EU Innolog je bil leta 2018 na območju rudnika Puharje izveden projekt z vrtnanjem, ki je pokazal, da je prvih 15 metrov jedra sestavljenega iz starih rudarskih odpadkov iz preteklih raziskovalnih in/ali eksploatacijskih dejavnosti (Teran et al., 2018).

Odlagališča odpadkov premogovnikov

Seznam zaprtih premogovnikov in z njimi povezanih odlagališč rudarskih odpadkov je podan v tabeli 5. Premogovniki so navedeni od premogovnikov z največjo prostornino rudarskih

Table 5. Summary of closed coal mines and associated mining waste (after Gosar et al., 2013a, b)

Tabela 5. Pregled zaprtih premogovnikov in z njimi povezanih rudarskih odpadkov (po Gosar et al., 2013a, b)

Mine Rudnik	Commodity Surovina	No. of waste sites Št. odlagališč odpadkov	Volume (m ³) Prostornina (m ³)	Area (m ²) Površina (m ²)
Trbovlje-Hrastnik	brown coal / rjavi premog	10	35,215,000	2,749,200
Kočevje	brown coal / rjavi premog	1	21,200,000	1,410,000
Kanižarica	brown coal / rjavi premog	2	12,600,000	840,000
Zagorje	brown coal / rjavi premog	2	4,490,000	449,000
Senovo	brown coal / rjavi premog	1	2,461,000	318,100
Laško	brown coal / rjavi premog	2	222,000	44,300
SUM VSOTA			76,188,000	5,810,600

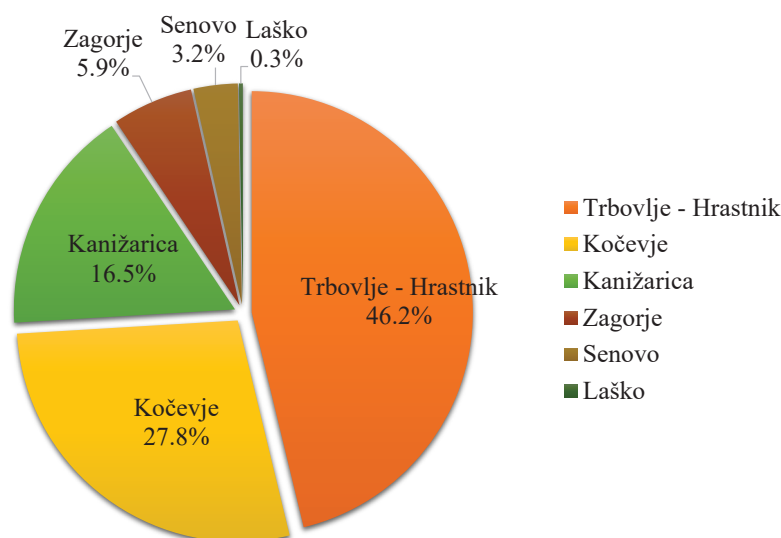


Fig. 2. The portion of coal mining waste in Slovenia produced by nowadays closed (or in closure) coal mines.

Sl. 2. Delež premogovniških odpadkov, proizvedenih v danes zaprtih (ali v zapiranju) premogovnikih.

Coal mining waste sites

Closed coal mines and associated mining waste sites are listed in table 5. The mines are ranked from the most to the least important according to the volume of mining waste generated during mining operations. On approximately 581 hectares of Slovenian territory 76,188,000 m³ of coal mining waste is stored in closed waste sites.

Almost half (46 %) of coal mine waste was produced by Trbovlje-Hrastnik coal mines, while the other two coal mines with still significant part of produced waste are Kočevje (28 %) and Kanižarica (17 %) (Table 5, fig. 2). Zagorje coal mine produced about 6 %, Senovo 3 % and Laško less than 1 % of the national coal mine waste.

The brown coal beds, which were exploited by the mines Trbovlje, Hrastnik, Zagorje, Laško and Senovo, are hosted by the Oligocene clastic

odpadkov do premogovnikov z manjšo prostornino rudarskih odpadkov, ki so bili proizvedeni med obratovanjem rudnikov. Na približno 581 hektarjih slovenskega ozemlja je na zaprtih odlagališčih odloženih 76.188.000 m³ premogovniških odpadkov.

Skoraj polovica (46 %) premogovniških odpadkov je bila proizvedena v premogovnikih Trbovlje in Hrastnik, preostala dva premogovnika z večjo količino proizvedenih odpadkov pa sta še Kočevje (28 %) in Kanižarica (17 %) (Tabela 5, sl. 2). Premogovnik Zagorje je proizvedel okoli 6 %, Senovo 3 % in Laško manj kot 1 % premogovniških odpadkov v Sloveniji.

Plasti rjavega premoga, ki so ga izkopavali v rudnikih Trbovlje, Hrastnik, Zagorje, Laško in Senovo, se nahajajo v oligocenskih klastičnih sedimentnih kamninah (Češmiga, 1959; Kušcer, 1967; Dozet, 1983). V Kočevju in Kanižarici se

sedimentary rocks (Češmiga, 1959; Kuščer, 1967; Dozet, 1983). The brown coal deposits in Kočevje and Kanižarica are hosted in clays, schists, sandstones of Upper Miocene or/and Pliocene age. Calorific value of Slovenian coals varied between 12 and 16 MJ/kg, ash yield between 20 and 25 % and humidity between 20 and 30 %. More information on Slovenian coals are available in Markič (2007) and Markič et al. (2007).

Mining of coal in Hrastnik and Trbovlje began in the early 19th century, but the production flourished after the railway Vienna-Trieste, which passed this area in 1849. The coal mines in Hrastnik and Trbovlje, which were during the time of operation for more than 150 years Slovenian largest brown coal mines, are operated by the national company Rudnik Trbovlje-Hrastnik d.o.o. (RTH) since 1996, which is at present in closing phase. A short history of the mines is available at the RTH official website (Internet 5). Between 1880 and 1949 Hrastnik mine produced about 12,429,000 tons of coal, while between 1871 and 2004 Trbovlje mine produced about 98,387,000 tons of coal (Bravec, 2008). The Trbovlje-Hrastnik mine production stopped in 2012. The mine has been gradually closed based on the Act Regulating the Gradual Closure of the Trbovlje-Hrastnik Mine and the Economic Development Restructuring of the Region (Official Gazette, No. 26/05 – official consolidated text, 43/10, 49/10 – corr., 40/12 – ZUJF, 25/14, 46/14, 82/15 and 84/18). It is estimated that during operation of Trbovlje-Hrastnik coal mine, several 10 million m³ of waste material (gangue materials and waste rock) were dumped on abandoned mining surfaces of about 274 hectares. Waste materials are composed mostly of limestones and marlstones (Dernovšek, 1979; Malovrh Repovž, 2012).

Mining of coal in Laško began in 1800. It flourished after 1870 but was still less important than coal mines in Zagorje, Trbovlje and Hrastnik. The coal mine produced about 6,077,000 tons of coal until 1992, when the production stopped. In 1998 the national authorities published a special order for permanent cessation of ore exploitation (Dernovšek, 1984; Strgar, 2003). During operation, waste was dumped at two sites (one is composed of 122,000 m³ and the other of 100,000 m³ of gangue material) together covering an area of approximately 4.4 hectares (Dernovšek, 1979; Strgar, 2003).

Mining works in Zagorje began in 1736 and the production stopped in 1996. The mine produced about 27,184,000 tons of coal. During operation of Zagorje mine gangue materials were

plasti rjavega premoga nahajajo v glinah, laporjih, peščenjakih in muljevcih zgornjemiocenske in/ali pliocenske starosti. Kurilna vrednost slovenskih premogov se je gibala med 12 in 16 MJ/kg, pepelnost med 20 in 25 % in vlaga med 20 in 30 %. Več informacij v zvezi s premogi je dostopnih v Markič (2007) in v Markič et al. (2007).

Z rudarjenjem v Hrastniku in Trbovljah so pričeli v začetku 19. stoletja. Proizvodnja je vzcvetela z izgradnjo Južne železnice Dunaj-Trst, ki je Zasavje dosegla leta 1849. Premogovnika Hrastnik in Trbovlje, ki sta bila v času obratovanja več kot 150 let naša največja premogovnika rjavega premoga, sta od leta 1996 v lasti državnega podjetja Rudnik Trbovlje-Hrastnik d.o.o. (RTH), ki je trenutno v postopku zapiranja. Kratka zgodovina premogovnikov je dostopna na uradni spletni strani RTH (Internet 5). Med leti 1880 in 1949 je premogovnik Hrastnik proizvedel okoli 12.429.000 ton premoga, medtem ko so med leti 1871 in 2004 v premogovniku Trbovlje pridobili okoli 98.387.000 ton premoga (Bravec, 2008). Proizvodnjo so v Rudniku Trbovlje-Hrastnik ustavili leta 2012. Rudnik je v postopnem zapiranju na podlagi Zakona o postopnem zapiranju Rudnika Trbovlje-Hrastnik in razvojnem prestrukturiranju regije (ZPZRTH) (Uradni list RS, št. 26/05 – uradno prečiščeno besedilo, 43/10, 49/10 – popr., 40/12 – ZUJF, 25/14, 46/14, 82/15 in 84/18). Ocenjeno je, da je bilo med obratovanjem premogovnika Trbovlje-Hrastnik na opuščene odkopne površine odloženih več 10 milijonov m³ odpadnega materiala (jamske jalovine in odkrivke) na okvirno 274 hektarjih površine. Odpadni material sestavljajo apnenci in laporovci (Dernovšek, 1979; Malovrh Repovž, 2012).

Premogovništvo v Laškem se je začelo leta 1800. Zlasti se je razširilo po letu 1870, a vedno ostalo mnogo manjše kot na območjih Zagorja, Trbovelj in Hrastnika. Do ustavitve proizvodnje leta 1992 je premogovnik Laško proizvedel okoli 6.077.000 ton premoga. Leta 1998 so državne oblasti izdale posebno odločbo za trajno prenehanje izkoriščanja rudnin (Strgar, 2003). Med obratovanjem so bili odpadki odloženi na dveh odlagališčih (eno sestavlja 122.000 m³ in drugo 100.000 m³ jamske jalovine), ki pokrivata približno 4,4 hektarja površine (Dernovšek, 1979; Strgar, 2003).

Začetki rudarjenja v Zagorju segajo v leto 1736, proizvodnja pa se je ustavila leta 1996. Premogovnik je proizvedel okoli 27.184.000 ton premoga. Med obratovanjem rudnika so odlagali jamsko jalovino na skupno odlagališče (4.490.000 m³; 45 ha) (Ribičič et al., 1987).

dumped at a single large waste site (4,490,000 m³; 45 ha) (Ribičič et al., 1987).

Mining works in Senovo began in 1819. More extended exploration works started in 1919, followed by exploitation in 1921. The mine produced about 11,597,000 tons of coal until the production ceased in 1997 (Markič, 1997). Mine established two large dumps of waste, one composed of 1,900,000 m³ of gangue material and the other of 561,000 m³ of gangue material and overburden rock. They cover an area of approximately 32 hectares (Seher, 1986; Markič, 1997).

The mining works in Kanižarica began in 1854 and the mine ceased production in 1996. About 4,102,000 tons of coal was produced during the entire operation (Markič, 1995; Mitrevski & Bravec, 1999). Waste dump (12,600,000 m³; 84 ha) from Kanižarica mine is large and consists of gangue materials (Markič, 1995).

The mines Zagorje, Senovo and Kanižarica are in closing phase based on Act Providing Funds for the Closure of Coal-Mines in Zagorje, Senovo and Kanižarica (Official Gazette, No. 1/95). The mine Kanižarica (Rudnik Kanižarica v zapiranju d.o.o., Črnomelj-in liquidation) is in liquidation, the mine Senovo (Rudnik Senovo v zapiranju d.o.o. - in bankruptcy) is in bankruptcy, Rudnik Zagorje (Rudnik Zagorje v zapiranju d.o.o., Zagorje, Grajska 2-in liquidation) is deleted from the business register 28. 12. 2017 (Internet 6).

The mining works in Kočevje began in the beginning of the 19th century. The mine ceased production in 1978. About 8,648,000 tons of coal was produced during the entire operation (Budkovič, personal communication). Waste dump (21,200,000 m³; 141 ha) from the Kočevje coal mine is large and comprises of gangue materials (Jelenc, 1956; Budkovič, personal communication).

Lithologically, waste from Laško, Senovo, Trbovlje-Hrastnik and Zagorje coal mines is composed of marlstone, claystone and subordinately of limestone/dolomite and clastic rocks. Waste from Kočevje consists of claystone, marlstone, and sandstone, while from Kanižarica of marlstone and claystone.

The inventory of data on closed (or in closing phase) and abandoned mines, open pits and mining waste sites in Slovenia

The inventory of closed (or in closing phase) and abandoned mines, open pits and mining waste sites in Slovenia, which is available via a hyperlink (<https://www.geo-zs.si/images/GoogleEarth/Inventar.kmz>), contains information on

Premog so na Senovem pričeli kopati leta 1819. Leta 1919 so se začela resnejša raziskovalna dela, leta 1921 pa je sledilo obsežnejše rudarjenje. Rudnik je proizvedel okoli 11.597.000 ton premoga do zaključka proizvodnje leta 1997 (Markič, 1997). Rudnik je imel dve veliki odlagališči odpadkov, prvega sestavlja 1.900.000 m³ jamske jalovine, drugega pa 561.000 m³ jamske jalovine in odkrivke. Odlagališči pokrivata okoli 32 hektarjev površine (Seher, 1986; Markič, 1997).

Premogovništvo v Kanižarici se je pričelo leta 1854, proizvodnjo pa so ustavili leta 1996. Med delovanjem premogovnika je bilo proizvedenih približno 4.102.000 ton premoga (Markič, 1995; Mitrevski & Bravec, 1999). Jamsko jalovino so odlagali na eno večje odlagališče (12.600.000 m³; 84 ha) (Markič, 1995).

Premogovniki Zagorje, Senovo in Kanižarica imajo status rudnikov v zapiranju na podlagi Zakona o zagotavljanju sredstev za zaprtje rudnikov rjavega premoga Zagorje, Senovo in Kanižarica (Uradni list RS, št. 1/95). Rudnik Kanižarica (Rudnik Kanižarica v zapiranju d.o.o., Črnomelj- v likvidaciji) je v likvidaciji, Rudnik Senovo (Rudnik Senovo v zapiranju d.o.o. - v stečaju) je v stečaju, Rudnik Zagorje (Rudnik Zagorje v zapiranju d.o.o., Zagorje, Grajska 2-v likvidaciji) pa je izbrisan iz poslovnega registra 28. 12. 2017 (Internet 6).

V Kočevju so pričeli pridobivati premog v začetku 19. stoletja, proizvodnja pa se je ustavila leta 1978. Med delovanjem je rudnik proizvedel okoli 8.648.000 ton premoga (Budkovič, osebna komunikacija). Jamska jalovina iz rudnika Kočevje je odložena na enem večjem odlagališču (21.200.000 m³; 141 ha) (Jelenc, 1956; Budkovič, osebna komunikacija).

Litološko so odpadki iz premogovnikov Laško, Senovo, Trbovlje-Hrastnik in Zagorje sestavljeni iz laporovca, glinavca in podrejeno apnenčevo/dolomitnih in klastičnih kamnin. Odpadke iz premogovnika Kočevje sestavljajo glinavci, laporovci in peščenjaki, iz premogovnika Kanižarica pa laporovci in glinavci.

Inventar podatkov o zaprtih (ali v fazi zapiranja) in opuščenih rudnikih, premogovnikih, površinskih kopih in odlagališčih rudarskih odpadkov v Sloveniji

Inventar podatkov o zaprtih (ali v fazi zapiranja) in opuščenih rudnikih, premogovnikih, površinskih kopih in odlagališčih rudarskih odpadkov v Sloveniji, ki je [dostopen na povezavi \(https://www.geo-zs.si/images/GoogleEarth/Inventar.kmz\)](https://www.geo-zs.si/images/GoogleEarth/Inventar.kmz), vključuje informacije o zaprtih in

closed and abandoned 33 metal mines, 43 coal mines, 3 non-metallic mineral resource mines, 48 non-metallic mineral resource open pits, 156 metal mine waste sites and 18 coal mine waste sites.

Metal mines, coal mines, non-metallic mineral resource mines or open pits (fig. 3) are described by the following information attributes (if available): name, location, geographical coordinates, type of ore, coal or rock mineral mined, status (closed, abandoned, or restored), quantity of raw materials mined (metals, coal and minerals) and references. For all, except for open pits of non-metallic mineral resources, additional information is included (if available): stratigraphy, lithology, history, geology, technical description, hydrogeological data, engineering data, potential, perspective and relevant references. Specific information is also included, such as the amount of metal extracted (tons), the shape, size and genetic type of the ore deposit for metal mines; the largest annual production of coal for coal mines; the size and genetic type of the mineral deposit for mines of non-metallic miner-

opuščenih 33 rudnikih kovin, 43 premogovnikih, 3 rudnikih nekovinskih mineralnih surovin, 48 površinskih kopih nekovinskih mineralnih surovin, 156 odlagališčih odpadkov iz rudnikov kovin in 18 odlagališčih odpadkov iz premogovnikov.

Rudniki kovin, premogovniki, rudniki in površinski kopi nekovinskih mineralnih surovin (sl. 3) so opisani z naslednjimi atributi (če so ti na voljo): ime, lokacija, geografske koordinate, vrsta surovine, ki se jo je izkoriščalo (ruda, premog, naravni kamen ali minerali), stanje (zaprt, opušen ali obnovljen), količina izkopanih surovin (kovine, premog, minerali) in reference. Za vse, razen površinske kope nekovinskih mineralnih surovin, so vključene še naslednje informacije (če so na voljo): stratigrafija, litologija, zgodovina, geologija, tehnični opis, hidrogeološki podatki, inženirski podatki, potencial, perspektivnost in ustrezne reference. Podane so tudi posebne informacije, kot so količina pridobljene kovine (v tonah), oblika, velikost in genetski tip rudišča za rudnike kovin; največja letna proizvodnja premoga za premogovnike; velikost in genetski tip nahajališč mineralnih surovin za

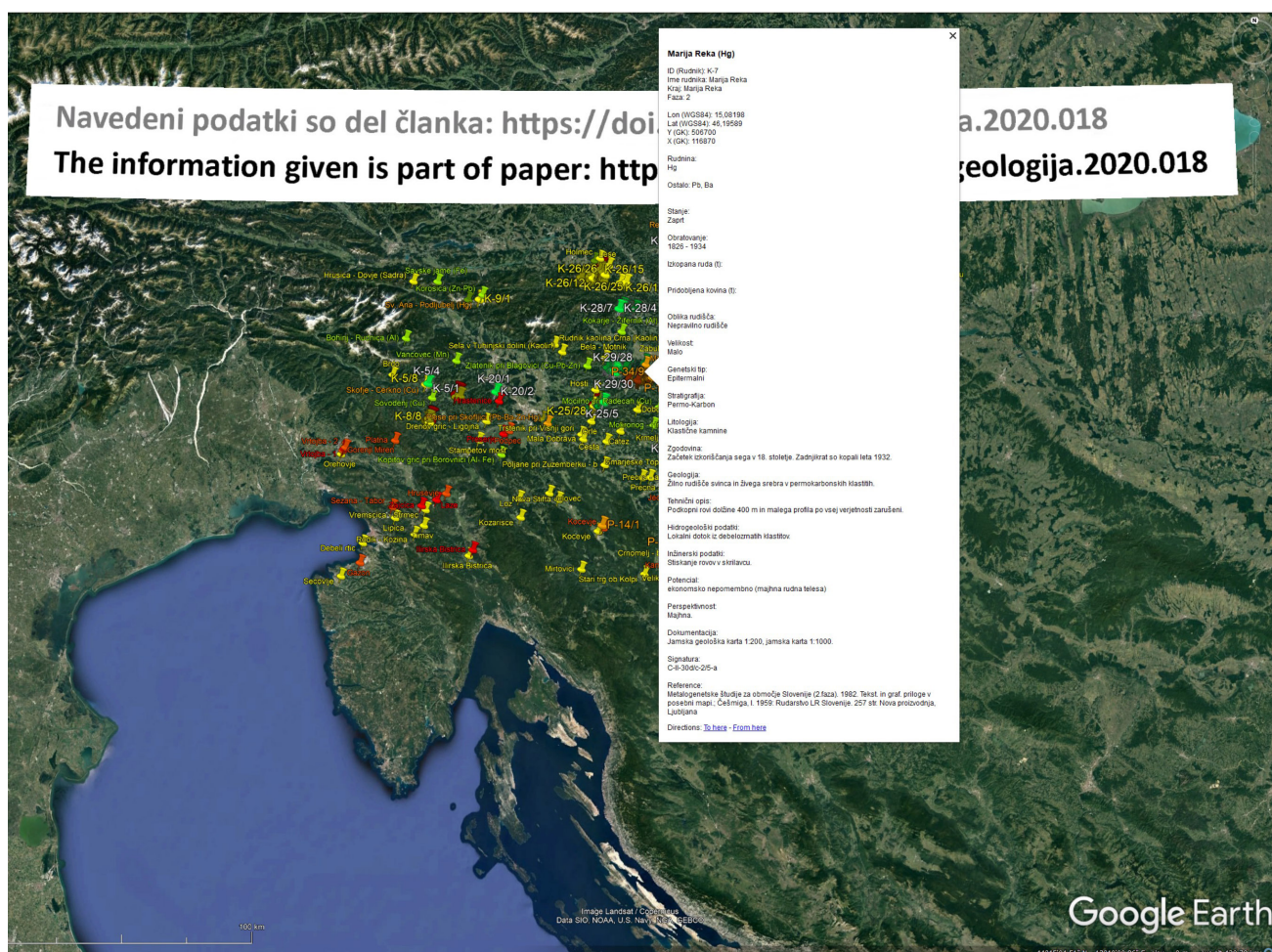


Fig. 3. An example of abandoned mine data in Google Earth application.

Sl. 3. Primer podatkov o opušenem rudniku v aplikaciji Google Earth.

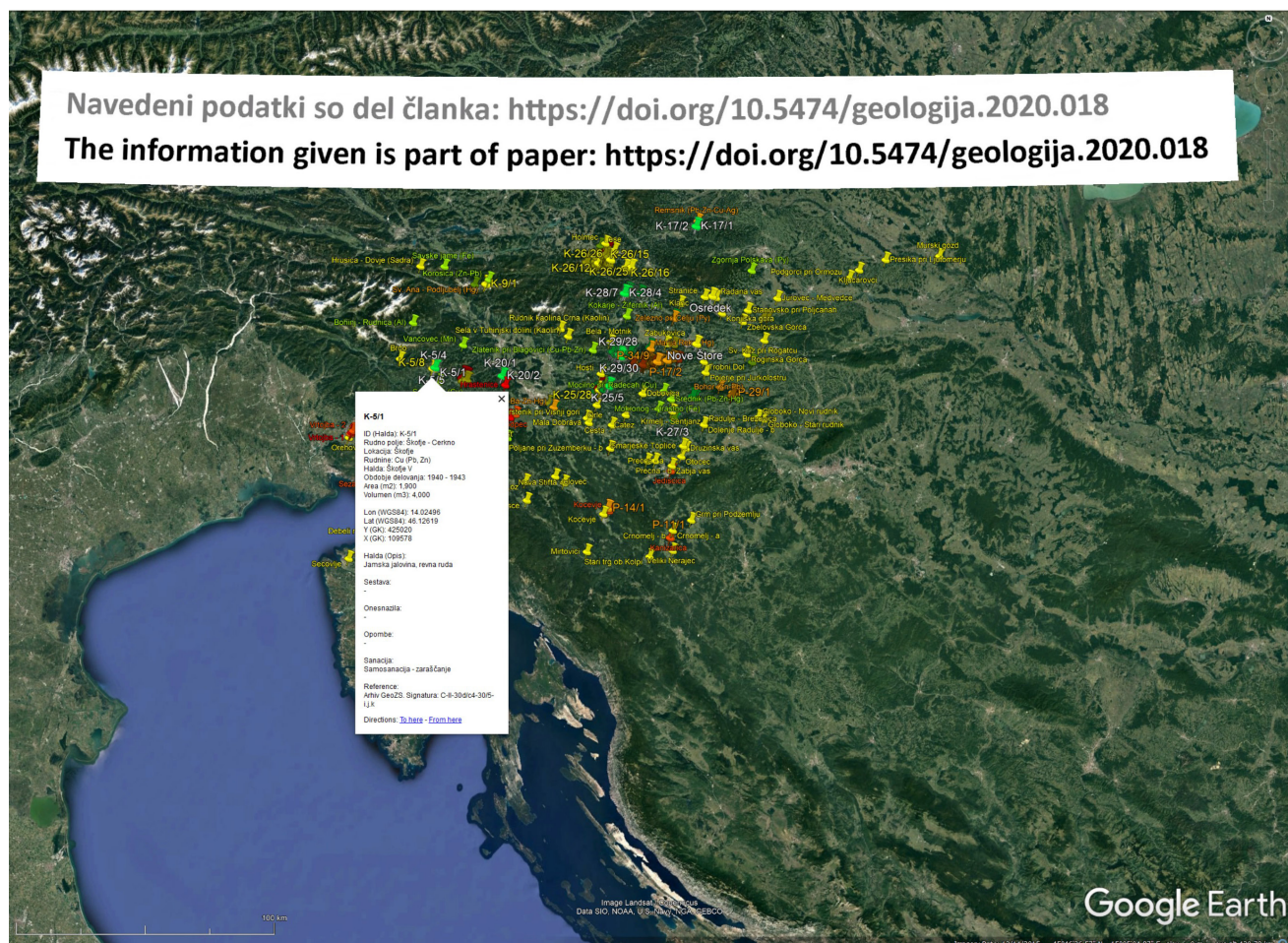


Fig. 4. An example of abandoned mining waste site data in Google Earth application.

Sl. 4. Primer podatkov o opuščnem odlagališču rudarskih odpadkov v aplikaciji Google Earth.

al resources; and the distance to settlements and description of rocks for open pits of non-metallic mineral resources.

Mining waste sites (fig. 4) are described by the following information attributes (if available): waste dump identification (ID code), name, ore district, location, geographical coordinates, valuable minerals, area (m²), volume (m³), type of waste, rock composition, pollutants, additional comments, restoration status and references.

Conclusion

At the request of the national authorities, Geological survey of Slovenia carried out a systematic collection of information on the following closed (or in closing phase) and abandoned mining sites in Slovenia: mines, open pits, and mining waste sites. The data collection became necessary due to potential environmental impacts, that could be the consequences of past mining activities. On the basis of the survey an *Inventary of closed (or in closing phase) and abandoned mines, open pits and mining waste sites in Slovenia* has been compiled and is freely available in the Google Earth file. The information is useful

rudnike nekovinskih mineralnih surovin; in oddaljenost od naselij in opis kamnin za površinske kope nekovinskih mineralnih surovin.

Odlagališča rudarskih odpadkov (sl. 4) so opisana z naslednjimi atributi (če so ti na voljo): identifikacija odlagališča (ID oznaka), ime, rudno polje, lokacija, rudnine, geografske koordinate, obdobje delovanja, površina (m²), volumen (m³), sestava, opis odlagališča, onesnaževala, opombe, sanacija in reference.

Zaključki

Na pobudo državnih organov je bil na Geološkem zavodu Slovenije opravljen sistematičen pregled obstoječih informacij o naslednjih zaprtih (ali v fazi zapiranja) in opuščeni rudarskih objektih v Sloveniji: rudnikih, premogovnikih, površinskih kopih in odlagališčih rudarskih odpadkov. Pregled podatkov je bil potreben zaradi možnih negativnih vplivov na okolje, ki bi lahko bili posledica nekdanjih rudarskih dejavnosti. Na podlagi pregleda je bil vzpostavljen *Inventar podatkov o zaprtih (ali v fazi zapiranja) in opuščeni rudnikih, premogovnikih, površinskih kopih in odlagališčih rudarskih odpadkov v Sloveniji*, ki je prosto dostopen

for various purposes, such as an overview of pollution sources in environmental impact assessments, spatial planning, etc.

Acknowledgement

The presented review paper and the presented data inventory are the result of many years of work carried out in many projects, the reports of which are given in the literature.

The final writing of the text and editing of the data was made possible by projects "Work Program of the Geological Survey of Slovenia for the Ministry of Infrastructure in 2020" (contract no. 2430-19-381013), research programs "Groundwater and Geochemistry (P1-0020)" and "Mineral Resources (P1-0025)" funded by the Research Agency of the Republic of Slovenia (ARRS) and the project entitled "Optimizing quality of information in RAW MATERIAL data collection across Europe (ORAMA)", funded by the European Union under H2020 – SC5-15-2017 – CSA. Financial support was also provided by the Slovenian National Commission for UNESCO, the National Committee of the International Program for Geosciences and Geoparks.

The authors thank many retired and active employees from the Geological Survey of Slovenia who participated in the research and data collection, especially the late mag. Tomaž Budkovič, who collected the data presented in this study extremely carefully for several years.

Special thanks go to mag. Suzana Fajmut Štrucl for supplying information on Mežica mine, Tatjana Dizdarevič for information on Idrija mine, representatives of Žirovski Vrh uranium mine and larger coal mines, for indispensable cooperation and assistance during review of existing data in documentation from mine archives.

We are also grateful to the two anonymous reviewers and especially to the third reviewer dr. Miloš Markič, for a detailed review of the work and numerous proposals for changes that have improved the work.

v obliki Google Earth datoteke. Ti podatki so uporabni za različne namene, kot so npr. pregled virov onesnaževanja v presojah o vplivih na okolje, za prostorsko načrtovanje in podobno.

Zahvala

Predstavljeni pregledni članek in zbrani podatki so rezultat večletnega dela, izvedenega v mnogih projektih, katerih poročila so navedena v seznamu literature.

Končno oblikovanje besedila in urejanje podatkov so omogočili projekti »Program dela Geološkega zavoda Slovenije za Ministrstvo za infrastrukturo v letu 2020« (naloga Rudniki v zapiranju in njihov vpliv na površino (št. pogodbe 2430-19-381013), raziskovalna programa »Podzemna voda in geokemija (P1-0020)« in »Mineralne surovine (P1-0025)«, ki ju financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS) in projekt z naslovom »Optimizing quality of information in RAW MATERIAL data collection across Europe (ORAMA)«, ki ga je financirala Evropska Unija v okviru H2020 – SC5-15-2017 – CSA. Finančno pomoč je nudila tudi Slovenska nacionalna komisija za UNESCO, Nacionalni odbor Mednarodnega programa za geoznanost in geoparke.

Avtorji se zahvaljujemo številnim upokojenim in aktivnim sodelavcem z Geološkega zavoda Slovenije, ki so sodelovali pri raziskavi in pri zbiranju podatkov, še posebno pokojnemu mag. Tomažu Budkoviču, ki je več let izjemno skrbno zbiral podatke, predstavljene v tej študiji.

Posebna zahvala gre tudi mag. Suzani Fajmut Štrucl za sodelovanje pri zbiranju podatkov o rudniku Mežica, Tatjani Dizdarevič za rudnik Idrija, ter predstavnikom rudnika urana Žirovski Vrh in večjih premogovnikov, za njihovo sodelovanje in pomoč pri pregledu obstoječih podatkov v dokumentaciji rudarskih arhivov.

Hvaležni smo tudi dvema anonimnima recenzentoma ter še posebno tretjemu, dr. Milošu Markiču, za natančen pregled dela in številne predloge za spremembe, ki so delo izboljšale.

Literature

Bavec, Š., Gosar, M., Miler, M. & Gaberšek, M. 2017: Mining waste – from a potential environmental threat to a secondary resource of raw materials. In: Kortnik, J. (ed.): 18th conference with international participation „Waste Management – GzO'17 Urban Mining“. Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška

fakulteta, oddelek za geotehnologijo in rudarstvo, Ljubljana: 15-24.

Bravec, B. 2008: Elaborat o klasifikaciji in kategorizaciji izračunanih zalog in virov premoega na pridobivalnem prostoru RTH s stanjem 31.12.2007. RTH Rudnik Trbovlje-Hrastnik d.o.o.

- Budkovič, T., Šajn, R. & Gosar, M. 2003: Vpliv delujočih in opuščenih rudnikov kovin in topilniških obratov na okolje v Sloveniji = Environmental impact of active and abandoned mines and metal smelters in Slovenia (in Slovenian). *Geologija*, 46/1: 135–140. <https://doi.org/10.5474/geologija.2003.014>
- Budkovič, T., Šajn, R. & Gosar, M. 2004: Pregled opuščenih rudnikov kovin in metalurških obratov v Republiki Sloveniji. *Arhiv Geološkega zavoda Slovenije*, C-II-30d/c-1/6.
- Budkovič, T., Šajn, R. & Gosar, M. 2005: Pregled delujočih in opuščenih premogovnikov ter rudnikov nekovinskih mineralnih surovin v Republiki Sloveniji. *Arhiv Geološkega zavoda Slovenije*, C-II-30d/h-2/18-a.
- Budkovič, T., Šajn, R., Gosar, M. & Fux, J. 2006: Aktivnosti v zvezi z EU direktivo o ravnanju z odpadki iz rudarskih in drugih ekstraktivnih dejavnosti; Inventar odlagališč jamskih, flotacijskih in topilniških deponij odpadkov v GIS okolju na območju Rudnika svinca in cinka Mežica. *Arhiv Geološkega zavoda Slovenije*, C-II-30d/h-3/18-b.
- Budkovič, T., Gosar, M. & Šajn, R. 2008: Inventar odlagališč rudniških in topilniških deponij odpadkov v GIS okolju na območju Litijskega rudnega polja. *Arhiv Geološkega zavoda Slovenije*, C-II-30d/h-1/21.
- Cigale, M. 2006: Rudnik živega srebra Idrija od 1490 do 2006. In: Režun, B., Eržen, U., Petrič, M. & Gantar, I. (eds.): 2. Slovenski Geološki Kongres, Zbornik povzetkov. Rudnik živega srebra v zapiranju d.o.o., Idrija: 13-16.
- Ciglar, K. 1962: Poročilo o geološko-rudarskih raziskavah na območju Ponikva-Železno-Šmartno v Rožni dolini. *Arhiv Geološkega zavoda Slovenije*, C-II-30d/c1-2/26-a.
- Čar, J. 1992: Rudniški žgalniški ostanki in radioaktivnost; Pregled dosedanjih raziskave in spoznanj o radioaktivnih elementih in nekontroliranem radioaktivnem sevanju v idrijskem rudišču in na območju Idrije. *Idrijski razgledi*, 37: 106-107.
- Čar, J. 1996: Mineralized rocks and ore residues in the Idrija region. In: Miklavčič, V. (eds.): Proceedings of the meeting of researchers entitled Idrija as a natural and anthropogenic laboratory: mercury as a major pollutant, May, 24 and 25, 1996, Idrija, Slovenia. Idrija, Mercury Mine: 10-15.
- Čar, J. 2010: Geološka zgradba idrijsko-cerkljanskega hribovja: Tolmač h Geološki karti idrijsko-cerkljanskega hribovja med Stopnikom in Rovtami 1 : 25000 = Geological structure of the Idrija-Cerkno hills: explanatory book to the Geological map of the Idrija-Cerkljansko hills between Stopnik and Rovte 1:25.000. Geološki zavod Slovenije = Geological survey of Slovenia, Ljubljana: 127 p.
- Češmiga, I. 1959: Rudarstvo LR Slovenije. Nova proizvodnja, Ljubljana: 267 p.
- Dernovšek, S. 1979: Elaborat o klasifikaciji, kategorizaciji in izračunu rezerv. Dopnilo k zalogam mineralnih surovin s stanjem 31.12.1978. *Arhiv Geološkega zavoda Slovenije*, C-II-30d/a2-31/20-s.
- Dimkovski, T. 1972: Geološke raziskave živega srebra na območju Podljubelj od 1965 do 1971 leta. *Arhiv Geološkega zavoda Slovenije*, C-II-30d/c11-23/3-r.
- Dimkovski, T. & Rokavec, D. 2001. Nahajališča nekovinskih mineralnih surovin v Sloveniji: površinski kopi.1. del. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 123 p.
- Directive 2006/21/EC. Directive 2006/21/EC of the European Parliament and of the Council of 15 March 2006 on the management of waste from extractive industries and amending Directive 2004/35/EC - Statement by the European Parliament, the Council and the Commission. Internet: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32006L0021> (20.05.2020)
- Dozet, S. 1983: Premogovne plasti v kočevski kadunji. *Rudarsko-metalurški zbornik*, 30/1: 51–67.
- Drovenik, F., Drovenik, M. & Vovk, D. 1967: Raziskave bakra širše okolice Cerknega 1967. *Arhiv Geološkega zavoda Slovenije*, C-II-30d/c4-30/5-i,j,k.
- Drovenik, F., Ogorelec, B., Drovenik, M. & Kitek, D. 1975: Geološke raziskave svinca in cinka Puharje 1974. *Arhiv Geološkega zavoda Slovenije*, C-II-30d/c5-31/20-p.
- Drovenik, M., Pleničar, M. & Drovenik, F. 1980: Nastanek rudišč v SR Sloveniji. *Geologija*, 23/1: 1-137.
- Drovenik, F., Drovenik, M., Premru, U., Miklič, F., Bidovec, M. & Karer, M. 1980: Metalogenetska karta SR Slovenije, 1:220.000. Geološki zavod Ljubljana in Raziskovalna skupnost Slovenije, Ljubljana.
- Fabjančič, M. 1972: Kronika litijskega rudnika. Rokopis. *Arhiv Geološkega zavoda Slovenije*.
- Florjančič, A.P. Pirc, S., Florjančič, N., Štern, J. & Omaljev, V. 2000: Rudnik urana Žirovski Vrh. *Didakta*: 416 p.
- Florjančič, A. P. 2006: Uranovo rudišče Žirovski Vrh. *Scopolia, Supplementum* 3: 101-105.

- Gosar, M. 2008: Mercury in River Sediment, Floodplains and Plants Growing thereon in Drainage Area of Idrija Mine, Slovenia. *Polish Journal of Environmental Studies*, 17/2: 227-236.
- Gosar, M. & Čar, J. 2006: Vpliv žgalnic živosrebrave rude iz 16. in 17. stoletja na razširjenost živega srebra v okolici Idrije = Influence of mercury ore roasting sites from 16th and 17th century on the mercury dispersion in surroundings of Idrija (in Slovenian). *Geologija*, 49/1: 91-101. <https://doi.org/10.5474/geologija.2006.007>
- Gosar, M., Pirc S. & Bidovec, M. 1997: Mercury in the Idrija River sediments as a reflection of mining and smelting activities of the Idrija mercury mine. *Journal of Geochemical Exploration*, 58: 125-131. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(96\)00064-7](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(96)00064-7)
- Gosar, M., Budkovič, T. & Šajn, R. 2007: Popis odlagališč rudniških in topilniških deponij odpadkov v GIS okolju na območju rudnika Idrija; Popis odlagališč rudniških in metalurških deponij odpadkov v GIS okolju na območju rudnika Žirovski Vrh. Arhiv Geološkega zavoda Slovenije, C-II-30d/h-5/18-d.
- Gosar, M., Šajn, R. & Miler, M. 2013a: Izdelava popisa zaprtih objektov za ravnanje z odpadki iz rudarskih in drugih dejavnosti izkoriščanja mineralnih surovin. Poročilo 1. faze projekta. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 120 p.
- Gosar, M., Šajn, R. & Miler, M. 2013b: Izdelava popisa zaprtih objektov za ravnanje z odpadki iz rudarskih in drugih dejavnosti izkoriščanja mineralnih surovin. Poročilo 2. faze projekta. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 106 p.
- Gosar, M., Šajn, R., Miler, M., Markič, M. & Čarman, M. 2014: Izdelava popisa zaprtih objektov za ravnanje z odpadki iz rudarskih in drugih dejavnosti izkoriščanja mineralnih surovin. Poročilo 3. faze projekta. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 49 p
- Gosar, M., Šajn, R. & Miler, M. 2015: Popis zaprtih objektov za ravnanje z odpadki iz rudarskih in drugih dejavnosti izkoriščanja mineralnih surovin = Inventory of closed facilities for treatment of wastes from mining and other activities of mineral resource extraction. In: Kortnik, J. (ed.): Zbornik 16. posvetovanja z mednarodno udeležbo Gospodarjenje z odpadki - GzO'15 Urbano rudarjenje, Ljubljana, 26-27 veliki srpan 2015 = Proceedings of 16th Conference with International Participation Waste Management - GzO'15 Urban Mining. Ljubljana: Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geotehnologijo, rudarstvo in okolje: p 27.
- Huisman, J., Baldé, K., Bavec, Š., Wagner, M., Loevik, A., Herreras, L., Chancerel, P., Emmerich, J., Sperlich, K., Modaresi, R., Ljungren Söderman, M., Forti, V., Mähltitz, P., Schillerup, H., Horvath, Z., Bobba, S., Eilu, P., Anta, M., Aasly, K., Stanley, G., Csaba, V., Kiss, J., Szabó, K., Nickolova, V. 2018: Recommendations for improving SRM datasets and harmonisation, Deliverable 2.2, ORAMA. Internet: https://orama-h2020.eu/wp-content/uploads/ORAMA_WP2_DEL2-2_20181207_UNU_v1.0.pdf (24.09.2019)
- Iskra, M. 1964: Poročilo o rezultatih geoloških raziskav na območju Škovec, objekt Mokronog-Tržišče v letu 1964. Arhiv Geološkega zavoda Slovenije, C-II-30d/c6-5/1-b.
- Iskra, M. 1969: Geološka starost rudonosnih plasti v Puharju = Zinc and lead ore deposit of Puharje (Slovenia). *Geologija*, 12: 161-164.
- Iskra, M., Drovenik, F. & Štrucl, I. 1974: Geološke raziskave svinca, cinka in antimona = Geological Exploration of Lead, Zinc and Antimony (in Slovenian). *Geologija*, 17: 517-519.
- Jelen, B. 2004: Rudarski projekt Končna ureditev odlagališča rudniške jalovine Jazbec, IRGO, Ljubljana, Arhiv RSC Mežica.
- Jokanović, V., Radošević, S. & Ristić, M. 1972: The Uranium Deposit of Žirovski Vrh. *Geologija*, 15: 91-93.
- Kavčič, I. 2008: Živo srebro: Zgodovina idrijskega žgalništva. Založba Bogataj, Idrija: 352 p.
- Kiss J., Jordán G., Detzky, G., Vértesy, L., Müller, T., Zsámbok, I., Paszera, G., Gulyás, Á., Óri, G., Rádi, K., Hermann, V., Jerabek, C., Abdaal, A. & Albert, J. 2012: Inventory and risk classification of closed mine waste facilities of Hungary. Budapest: The Hungarian Office for Mining and Geology, Eötvös Loránd Geophysical Institute of Hungary, Hungarian Geological Institute, 42 p.
- Kuščer, D. 1967: Zagorski terciar = Tertiary Formations of Zagorje. *Geologija*, 10: 5-85.
- Kušej, J. 1992: Elaborat o klasifikaciji, kategorizaciji in proračunu rezerv svinca in cinka, 31.12.1991.
- Lednik, Š. 1994: O podobi in preteklosti kraja ob njegovi 840-letnici = On the appearance and the past of the town on its 840th anniversary (in Slovenian). Mežica. Self-publication, Prevalje.

- Malovrh Repovž, M. 2012: Elaborat o klasifikaciji in kategorizaciji izračunanih zalog in virov rjavega premoga na pridobivalnem prostoru RTH s stanjem 31.12.2012.
- Markič, M. 1995: Elaborat o kategorizaciji, klasifikaciji in izračunu zalog premoga na območju Rudnika rjavega premoga Kanižarica - stanje 31.12.1994. Arhiv Geološkega zavoda Slovenije, C-II-30d/a9-52/13-15.
- Markič, M. 1997: Elaborat o kategorizaciji, klasifikaciji in izračunu zalog premoga na območju Rudnika Senovo v zapiranju - stanje 31.12.1996. Arhiv Geološkega zavoda Slovenije, C-II-30d/a2-50/35-11.
- Markič, M. 2007: Premogi v Sloveniji ter prikaz njihovih nahajališč na šestih izbranih kartah. Mineralne surovine v letu 2014: 149-165. Internet: http://www.geo-zs.si/PDF/PeriodicnePublikacije/Bilten_2006.pdf (19.05.2020)
- Markič, M., Kalan, Z., Pezdič, J. & Faganeli, J. 2007: H/C versus O/C atomic ratio characterization of selected coals in Slovenia = Opredelitev nekaterih premogov na ozemlju Slovenije s H/C proti O/C atomskimi razmerji. *Geologija*, 50/2: 403-426. <https://doi.org/10.5474/geologija.2007.028>
- Miklavčič, V. 1999: Mercury in the town of Idrija (Slovenia) after 500 years of mining and smelting. In: Ebinghaus, R., Turner, R.R., de Lacerda, L.D., Vasiliev, O. & Salomons, W. (eds.): Mercury contaminated sites: characterization, risk assessment and remediation. Springer, Berlin: 259-270.
- Miler, M., Gosar, M., Bavec, Š. & Gaberšek, M. 2019: Closed mine waste deposits in Slovenia and their impact on land degradation. In: Ribeiro, D. et al. (ed.): Abstracts and guide book. Založba ZRC: Association of Slovenian Geographers, Ljubljana: p. 58.
- Mitrevski, G. & Bravec, B. 1999: Elaborat o kategorizaciji, klasifikaciji in izračunu zalog premoga na območju RRP Kanižarica - stanje 31.12.1994. Renovelacija elaborata na stanje 31.12.1999. Arhiv Geološkega zavoda Slovenije, C-II-30d/a2-92/13-55.
- Mlakar, I. 1967: Primerjava spodnje in zgornje zgradbe Idrijskega rudišča = Relations between the lower and the upper structure of the Idrija ore deposit. *Geologija*, 10: 87-126.
- Mlakar, I. 1971: Izračun rudnih zalog halde Prejnuta. RŽS Idrija.
- Mlakar, I. 1974: Osnovni parametri proizvodnje rudnika Idrija skozi stoletja do danes. Idrijski razgledi, 19/3-4: 1-40.
- Mlakar, I. 1979: Metalogenetska karta Slovenije, (7. faza). Arhiv Geološkega zavoda Slovenije, C-II-30d/c-7/2j.
- Mlakar, I. 1982a: Metalogenetske študije za območje Slovenije (2. faza). Rokopis. Arhiv Geološkega zavoda Slovenije, Ljubljana, C-II-30d/b-1/50.
- Mlakar, I. 1982b: Metalogenetske študije za območje Slovenije (3. faza). Arhiv Geološkega zavoda Slovenije, C-II-30d/c-3/5-b.
- Mlakar, I. 1990: O litološki, stratigrafski in strukturni kontroli orudjenja ter o starosti antimonovega rudišča Lepa Njiva = On the lithologic, stratigraphic and structural control of mineralisation and the age of the Lepa Njiva antimony deposit. *Geologija*, 33: 353-395. <https://doi.org/10.5474/geologija.1990.009>
- Mlakar, I. 1994: O problematiki Litijskega rudnega polja = On the problems of the Litija ore field. *Geologija*, 36: 249-338. <https://doi.org/10.5474/geologija.1994.013>
- Mlakar, I. 2001: Grödenska formacija na območju Radeč = Val Gardena Formation in Radeče region (Slovenia) (in Slovenian). *Geologija*, 44/2, 243-261. <https://doi.org/10.5474/geologija.2001.018>
- Mlakar, I. 2003: O problematiki Ba, Pb, Zn rudišča Pleše = On the problems of Ba, Pb, Zn Pleše ore deposit (Slovenia). *Geologija*, 46/2: 185-224. <https://doi.org/10.5474/geologija.2003.018>
- Mlakar, I. & Čar, J. 2009: Geološka karta idrijsko-cerkljanskega hribovja med Stopnikom in Rovtami 1:25.000 = Geological structure of the Idrija-Cerkno hills between Stopnik and Rovte 1:25.000. Geološki zavod Slovenije = Geological survey of Slovenia.
- Mohorič, I. 1957: Zgodovina obrti in industrije v Trziču. Državna založba Slovenija, Ljubljana: 379 p.
- Mohorič, I. 1978: Problemi in dosežki rudarjenja na Slovenskem: zgodovina rudarstva in topilništva v stoletju tehnične revolucije: Knjiga 1, Osnove rudarskega dela. Založba Obzorja, Maribor: 281 p.
- Petkovšek, A., Pulko, B. & Majes, B. 2005: Rudarski projekt za izvajanje del Sanacija in končna ureditev odlagališča hidrometalurške jalovine Boršt. GZL Inženiring d.d. in IBE, d.d. Ljubljana; Arhiv RSC Mežica
- Pirc, S & Herlec, U. 2009: Mineralne in energetske surovine = Mineral and Energy raw Materials. In: Pleničar, M., Ogorelec, B. & Novak, M. (eds.): *Geologija Slovenije = The Geology of Slovenia*. Geološki zavod Slovenije = Geological Survey of Slovenia: 517-540.

- Placer L. 1973: Rekonstrukcija krovne zgradbe idrijsko žirovskega ozemlja = Reconstruction of the Nappe Structure of the Idrija-Žiri Region (in Slovenian). *Geologija*, 16: 317-334.
- Placer, L. & Čar, J. 1977: Srednjetriadna zgradba idrijskega ozemlja = The Middle Triassic Structure of the Idrija Region. *Geologija*, 20: 141-166
- Potter, H. & Johnston, D. 2012: Inventory of closed mining waste facilities. Environment Agency, Bristol: 29 p.
- Režun, B. 1990: Elaborat o izračunu rudnih rezerv rudnika Idrija (31. 12. 1989). RŽS Idrija.
- Režun, B. & Dizdarevič, T. 1997: The influence of surface waters and mine waters on the closing down of the Idrija Mercury Mine. In: Veselič, M. & Norton, P.J. (eds.): Mine water and the environment. IRGO, Ljubljana: 85-94.
- Ribičič, M., Andrič, Z. & Rijavec, B. 1987: Geotehnično poročilo o terenskih raziskavah plazu Ruardi, vzhodne in zahodne deponije s predlogi sanacije. Arhiv Geološkega zavoda Slovenije, J-II-30d/b2-1/218.
- Rokavec, D. 2014: Gline v Sloveniji. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 95 p.
- Rokavec, D. & Mezga, K. 2017: Mineral Deposits of Public Importance (MDoPI) in Slovenia = Nahajališča mineralnih surovin javnega pomena v Sloveniji. *Geologija*, 60/1: 117-128. <https://doi.org/10.5474/geologija.2017.009>
- Rudnik Žirovski Vrh in IBE d.d., 1997: Arhiv RSC Mežica. Rudarski projekt za izvajanje sanacije zunanjih jamskih objektov in objektov predelovalnega obrata Rudnika urana Žirovski Vrh. Št. proj. B103/31-M00/3, Ljubljana.
- Seher, A. 1986: Zgodovina premogovnika Senovo, TOZD RRP Senovo: 261 p.
- Senegačnik A., Markič, M. & Rajver, D. 2018: State of affairs in the field of mineral resources in Slovenia in 2017. *Bulletin Mineral Resources in Slovenia*, year 2018: 4-5. Internet: http://www.geo-zs.si/PDF/PeriodicnePublikacije/bilten_ms_eng/Bilten_2018.pdf (3.09.2019)
- Senegačnik, A. 2015: Stanje na področju mineralnih surovin v Sloveniji v letu 2014. Mineralne surovine v letu 2014: 10-13. Internet: https://www.geo-zs.si/PDF/PeriodicnePublikacije/Bilten_2014.pdf (3.09.2019)
- Sivac, J., Kegel, L., Sučić, S., Kralj, M., Daris, I. & Viršek, S. 2018: Program dela in finančni načrt ARAO za 2019, Revizija 0.4. ARAO. Ravnanje z radioaktivnimi odpadki. Internet: [http://84.39.218.201/MANDAT18/VLADNA GRADIVA.NSF/18a6b9887c33a0bdc12570e50034eb54/984e016d53e24d9ec-12583ba0053429d/\\$FILE/VG1_PDFN_ARAO_2019_priloga.pdf](http://84.39.218.201/MANDAT18/VLADNA GRADIVA.NSF/18a6b9887c33a0bdc12570e50034eb54/984e016d53e24d9ec-12583ba0053429d/$FILE/VG1_PDFN_ARAO_2019_priloga.pdf)
- Stanley, G., Gallagher, V., Ní Mhairtín, F., Brogan, J., Lally, P., Doyle, E. & Farrell, L. 2009: Historic Mine Sites – Inventory and Risk Classification, Volume 1. Wexford: Geological Survey of Ireland, Environmental Protection Agency, Exploration and Mining Division, 170 p.
- Stanley, G., Jordan, G., Hamor, T. & Sponar, M. 2011: Guidance document for a risk-based pre-selection protocol for the inventory of closed waste facilities as required by article 20 of directive 2006/21/EC. Internet: http://ec.europa.eu/environment/waste/mining/pdf/Pre_selection_GUIDANCE_FINAL.pdf. (27.08.2019)
- Strgar, I. 2003. Final geological and mining exploration and reasons for the brown coal mine Laško closure. Zadnje rudarsko-geološke raziskave rudnika Laško. *Geologija*, 46/1: 141-158. <https://doi.org/10.5474/geologija.2003.015>
- Testa, L. & Zupančič, L. 1942: Il giacimento di zinco di Tržišče. Priložena geol. skica in karta starih rudarskih del. Arhiv Geološkega zavoda Slovenije, C-II-30d/c6-1/1.
- Teran, K. 2011: Rudni pojavi in stara rudarska dela na Ledini nad Sevnico. Društvene novice: glasilo Društva prijateljev mineralov in fosilov Slovenije, 44: 31-34.
- Teran, K., Lapajne, A., Šram, D. & Matoz, T. 2018: Exploration borehole InnoLOG-1/18. In: Novak, M. & Rman, N. (eds.): Zbornik povzetkov/Book of abstracts, 5. slovenski geološki kongres, Velenje 3.-5. 10. 2018. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 84-85.
- Teršič, T., Gosar, M. & Šajn, R. 2006: Environmental impacts of abandoned mercury mine in Podljubelj. Ljubljana: Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 123 p.
- Teršič, T., Gosar, M. & Biester, H. 2011a: Environmental impact of ancient small-scale mercury ore processing at Pšenk on soil (Idrija area, Slovenia). *Applied Geochemistry*, 26/11: 1867-1876. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.06.010>
- Teršič, T., Gosar, M. & Biester, H. 2011b: Distribution and speciation of mercury in soil in the area of an ancient mercury ore roasting site, Frbežene trate (Idrija area, Slovenia). *Journal of geochemical exploration*, 110/2: 136-145. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.05.002>

- Teršič, T., Miler, M., Gaberšek, M. & Gosar, M., 2018: Vsebnosti arzena in nekaterih drugih prvin v potočnih sedimentih in vodah porečja Medije, osrednja Slovenija. *Geologija*, 61/1: 5-24. <https://doi.org/10.5474/geologija.2018.001>
- Trajanova, M. & Žorž, Z. 2013: Opuščen rudnik Remšnik z ramsbeckitom in namuwitom = Abandoned Remšnik mine with ramsbeckite and namuwite, *Geologija*, 56/1: 97-105. <https://doi.org/10.5474/geologija.2013.005>
- Uradni list SRS, št. 5/88 / Official Gazette, No. 5/88. Zakon o zagotavljanju dela sredstev, potrebnih za postopno zapiranje Rudnika svinca in cinka v Mežici (ZZDSP) / Act Providing Part of the Funds Required for Gradual Closure of the Mežica Lead and Zink Mines. Internet: <http://pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO1741> (29.08.2019)
- Uradni list RS, št. 1/95 / Official Gazette, No. 1/95. Zakon o zagotavljanju sredstev za zaprtje rudnikov rjavega premoga Zagorje, Senovo in Kanižarica (ZZRZSK) / Act Providing Funds for the Closure of Coal-Mines in Zagorje, Senovo and Kanižarica. Internet: <http://pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO392> (29.08.2019)
- Uradni list RS, št. 26/05 – uradno prečiščeno besedilo, 43/10, 49/10 – popr., 40/12 – ZUJF, 25/14, 46/14, 82/15 in 84/18 / Official Gazette, No. 26/05 – official consolidated text, 43/10, 49/10 – corr., 40/12 – ZUJF, 25/14, 46/14, 82/15 and 84/18. Zakon o postopnem zapiranju Rudnika Trbovlje–Hrastnik in razvojnem prestrukturiranju regije (ZPZRTH) / Act Regulating the Gradual Closure of the Trbovlje–Hrastnik Mine and the Economic Development Restructuring of the Region. Internet: <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO2053> (29.08.2019)
- Uradni list RS, št. 26/05 – uradno prečiščeno besedilo / Official Gazette, No. 26/05 – official consolidated text. Zakon o preprečevanju posledic rudarjenja v rudniku živega srebra Idrija (ZPPPR) / Prevention of Effects of Mining in the Idrija Mercury Mine Act. Internet: <http://pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO157> (29.08.2019)
- Uradni list RS, št. 22/06 – uradno prečiščeno besedilo / Official Gazette, No. 22/06 – official consolidated text. Zakon o trajnem prenehanju izkoriščanja uranove rude in preprečevanju posledic rudarjenja v Rudniku urana Žirovski Vrh (ZTPIU) / Permanent Cessation of the Uranium Ore Exploitation and Prevention of Effects of Mining at the Žirovski Vrh Uranium Mine Act. Internet: <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO227&d=16544--s2=&d16544--o-2&d-16544-p=1> (29.08.2019)
- Uradni list RS, št. 43/08 in 30/11 / Official Gazette, No. 43/08 and 30/11. Uredba o ravnanju z odpadki iz rudarskih in drugih dejavnosti izkoriščanja mineralnih surovin / Decree on the management of waste from the extractive industries. Internet: <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED4693> (29.08.2019)
- Verbič, M. 1965: Idrijski rudnik do konca 16. stoletja. Inavguralna disertacija, Ljubljana.
- Verbič, M. 1970: O lesu za Idrijski rudnik, prvih idrijskih grabljah in klavžah. *Idrijski razgledi XV/2*, Idrija: 89-99.
- Wagner, M., Baldé, K., Bavec, Š., Loevik, A., Herreras, L., Chancerel, P., Emmerich, J., Sperlich, K., Huisman, J., Forti, V., Mährlitz, P., Schillerup, H., Horvath, Z., Bobba, S., Eilu, P., Anta, M., Aasly, K., Stanley, G., Csaba, V., Kiss, J., Szabó, K. & Habib, H. 2018: Inventory Analysis of data collection methods and sources for the improvement of SRM statistical datasets, Deliverable 2.1, ORAMA. Internet: https://orama-h2020.eu/wp-content/uploads/ORAMA_WP2_-DEL2.1_20180531_v1.0.pdf (23.09.2019)
- Wagner, M., Bavec, Š., Herreras, L., Loevik, A., Ljunggren Söderman, M., Emmerich, J., Emmerich, J., Huisman, J., Sperlich, K., Tivander, J., Hajósi, E., Mährlitz, P., Baldé, K., Habib, H., Horvath, Z., Csaba, V., Kiss, J., Szabó, K., Sörös L. & Hribernik, K. 2019: Draft Good Practice Guidelines for the collection of SRM data, improvement potential, definition and execution of Case Studies, Deliverable 2.3, ORAMA. Internet: https://orama-h2020.eu/wp-content/uploads/ORAMA_WP2_DEL2.3_20192905_v1.0.pdf (24.09.2019)
- Zorc, A. 1955: Mining Geological Features of the Mežica Ore-Deposit. *Geologija*, 3: 24-80.
- Žorž, Z. & Moser, B. 2002: Remšnik. Založba Voranc, Ravne na Koroškem: 131 p.
- Internetni viri / Internet sources:
 Internet 1: Geološki zavod Slovenije in Republika Slovenija Ministrstvo za Infrastrukturo: Rudarska knjiga. Dostopno na <https://ms.geo-zs.si/> (13.08.2019)
 Internet 2: Slovenian Nuclear Safety Administration, Ministry of the Environment, Spatial Planning and Energy, Republic of

Slovenia. The first Slovenian Report under the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. http://www.ursjv.gov.si/fileadmin/ujv.gov.si/pageuploads/si/Porocila/NacionalnaPorocila/1._nacionalno-porocilo-SKRAO-2003.pdf (23.08.2019)

Internet 3: Uprava Republike Slovenije za jedrsko varnost, Ministrstvo za okolje in prostor, Republika Slovenija. Poročilo o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti v Republiki Sloveniji leta 2017. <https://www.gov.si/assets/organi-v-sestavi/URSVS/Letna-porocila/89e084d129/Letno-porocilo-o-varstvu-pred-sevanji-in-jedrski-varnosti-2017.pdf> (19.05.2020)

Internet 4: Slovenian Nuclear Safety Administration, Ministry of the Environment and Spatial Planning, Republic of Slovenia. Sixth Slovenian Report under the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. <https://www.gov.si/assets/organi-v-sestavi/URSJV/Dokumenti/Splosne-zadeve/Porocila/Porocila-po-konvencijah/Nacionalno-porocilo-SKRAO-2018.pdf> (19.05.2020)

Internet 5: Official website of the company Trbovlje-Hrastnik Mine. Dostopno na <https://www.rth.si/o-podjetju/predstavitev> (13.08.2019)

Internet 6: <http://www.bizi.si/> (11.06.2020)



Synthesis of past isotope hydrology investigations in the area of Ljubljana, Slovenia

Pregled preteklih izotopskih hidroloških raziskav na območju Ljubljane, Slovenija

Klara NAGODE¹, Tjaša KANDUČ¹, Sonja LOJEN¹, Branka BRAČIČ ŽELEZNIK²,
Brigita JAMNIK² & Polona VREČA¹

¹Jožef Stefan Institute, Department of Environmental Sciences, Jamova 39, SI-1000 Ljubljana, Slovenia;
e-mail: klara.nagode@ijs.si

²JP VOKA SNAGA d.o.o., Vodovodna 90, 1000 Ljubljana, Slovenia

Prejeto / Received 5. 5. 2020; Sprejeto / Accepted 2. 11. 2020; Objavljeno na spletu / Published online 7. 12. 2020

Key words: water, stable isotopes, hydrogen, oxygen, carbon, Ljubljansko polje, Ljubljansko barje

Ključne besede: stabilni izotopi, vodik, kisik, ogljik, Ljubljansko polje, Ljubljansko barje

Abstract

Water isotope investigations are a powerful tool in water resources research as well as in understanding the impact that humans have on the water cycle. This paper reviews past hydrological investigations of the Ljubljansko polje and Ljubljansko barje aquifers that supply drinking water to the City of Ljubljana, with an emphasis on hydrogen, oxygen and carbon stable isotope ratios. Information about the methods used and results obtained are summarised, and the knowledge gaps identified. Overall, we identified 102 records published between 1976 and 2019. Among them, 41 reported stable isotope data of groundwater, surface water and precipitation and were further analysed. Isotope investigations of the Ljubljansko barje began in 1976, while groundwater and surface water investigations of the Ljubljansko polje and along the Sava River began as late as 1997. Isotope investigations of carbon started even later in 2003 in the Ljubljansko polje and in 2010 in the Ljubljansko barje. These investigations were performed predominantly in the frame of short-term groundwater research projects at five main wellfields and sites along the Sava River. Almost no large-scale, long-term stable isotope studies have been conducted. The exceptions include groundwater monitoring by the Union Brewery in Ljubljana (2003–2014) and precipitation in Ljubljana since 1981. Since 2011, more detailed surveys of the Ljubljansko barje were performed, and in 2018, the first extensive investigation started at wellfields and objects that form part of the domestic water supply system. Given the number of available studies, we felt that publishing all the numerical data and appropriate metadata would allow for a better understanding of the short and long-term dynamics of water circulation in the urban environment. In the future, systematic long-term approaches, including the appropriate use of isotopic techniques, are needed.

Izvleček

Izotopske raziskave se uporabljajo za proučevanje vodnih virov ter človeškega vpliva na vodni krog. V članku podajamo pregled preteklih izotopskih hidroloških raziskav na območju ljubljanskih vodonosnikov s poudarkom na uporabi razmerij stabilnih izotopov vodika, kisika in ogljika do leta 2019. Zbrali smo podatke o metodah in rezultatih ter identificirali glavne pomanjkljivosti preteklih raziskav. V sklopu pregleda smo zbrali različne vire (skupno 102) z informacijami, ki se nanašajo na karakterizacijo vodonosnikov, pomembnih za oskrbo z vodo na območju mestne občine Ljubljana. Med zbranimi viri je 41 takšnih, ki smo jih podrobneje pregledali, saj poročajo o izotopskih raziskavah podzemne in površinske vode ter padavin. V Sloveniji so bile izotopske raziskave kisika in vodika v podzemni vodi prvič izvedene na Ljubljanskem barju leta 1976, medtem ko so se raziskave na Ljubljanskem polju ter na reki Savi pričele šele 1997. Izotopske raziskave ogljika v podzemni vodi so se pričele kasneje: na Ljubljanskem polju leta 2003 ter na Ljubljanskem barju leta 2010. Spremljanje izotopske sestave se je na obravnavanem območju v preteklosti izvajalo večinoma v sklopu različnih raziskav podzemne vode v glavnih petih črpališčih ter na reki Savi. Raziskave so potekale pretežno v sklopu različnih kratkotrajnih projektov ter so redko vključevale večje območje (npr. Ljubljansko polje in barje). Daljše zvezne izotopske raziskave podzemne vode so potekale od 2003 do 2014 na območju Pivovarne Union, spremljanje padavin pa poteka v Ljubljani od leta 1981. Od leta 2011 so potekale podrobnejše izotopske raziskave na Ljubljanskem barju, leta 2018 pa so bile opravljene prve obsežnejše izotopske raziskave, tako na črpališčih kot tudi objektih, ki so del javnega vodovodnega sistema. Ugotovili smo, da je objavljanje numeričnih podatkov in ustreznih metapodatkov pomembno. Pregled razpoložljivih virov kaže, da bi objava vseh numeričnih podatkov in ustreznih metapodatkov omogočila boljše razumevanje kratke in dolgoročne dinamike kroženja vode v urbanem okolju, zato so v prihodnosti potrebni sistematični dolgoročni pristopi, ki bodo vključevali tudi ustrezno uporabo izotopskih tehnik.

Introduction

As Bowen et al. (2019) states “*Earth’s water cycle links solid Earth, biological, and atmospheric systems, and it is both pivotal to the fundamental understanding of our planet and critical to our practical well-being.*” In nature, water is bound in different compartments of the hydrosphere (ice, groundwater, surface water, lakes, soil moisture reservoirs, oceans, and biomass), biosphere, lithosphere and the atmosphere, which form part of a global hydrological cycle. The rapid growth in population, coupled with an increased demand for water by agriculture and industry, are putting pressure on water resources (Mook, 2001). Although the impact that humans are having on the water cycle is indisputable, there is still a lot unknown about how water usage alters regional and global water budgets (Bowen et al., 2019). One of the prerequisites for efficient management of water resources is having reliable information about the quantity and the quality of the resource that is being exploited (Dansgaard, 1954; Craig, 1961).

Stable water isotopes (^1H , ^2H , ^{16}O , ^{17}O and ^{18}O) and carbon isotopes (^{12}C and ^{13}C) in the dissolved inorganic carbon (DIC) occur naturally. They can be measured using isotope-ratio mass spectrometry (dual-inlet or continuous-flow) (de Groot, 2004), laser spectroscopy (Wassenaar et al., 2018), or by spectrometric imaging methods (Bowen et al., 2019). An isotope abundance of an element is generally reported in ‰ (per mill = parts per thousand = 10^{-3}) deviations relative to the known isotope abundance of a standard, δ : (Gat, 1996):

$$\delta (\text{‰}) = (R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}} - 1) \times 10^3$$

where R_{sample} and R_{standard} present isotope ratios ($^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$) of a heavy isotope to a light isotope in a sample and an international standard, respectively. Because the numerical values obtained by this equation are small they are expressed in delta notation (δ). Delta values can be negative or positive numbers meaning that the isotope ratio of the sample is lower or higher relative to a standard (Gat, 1996; Meier-Augenstein & Schimmelmann, 2019).

Isotopes are an important tool for studying the water cycle and can be divided into two main categories: environmental isotopes (isotope variations in waters by natural processes) and artificial radioactive isotopes (radioactive isotopes that are injected into the system under investigation) (Kendall & Doctor, 2003). $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values are important in different applications (Gat, 1996; Clark & Fritz, 1997; Ehleringer et al., 2008; Clark, 2015; Bowen et al., 2019):

- $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ can be used as conservative tracers if the isotope signature is unmodified within a study system, i.e., to identify water sources contributing to water sampled at a given place;
- $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ and their variations can enable the identification of important water and carbon cycle processes overlooked by other methods;
- $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ can link information on the history of water as it moves through the hydrological cycle.

Isotope methods were introduced into catchment hydrology research to help scientists to understand better the geographical origin of water, recharge and discharge processes, biogeochemical processes and the sources and mechanisms of pollution (Clark & Fritz, 1997; Aggarwal et al., 2005; Bowen et al., 2005; Ehleringer et al., 2008; 2016; Jameel et al., 2016; Du et al., 2019).

Concerns over climate change and the increasing demand for water in urban areas has focused research on water supplies and dynamics within the urban system in order to gain a better understanding of the connections between human populations, climate, and water extraction (Ehleringer et al., 2016; Zhao et al., 2017; Tipple et al., 2017).

Water circulates in nature differently than in urban environments, where the world’s population is expected to increase to more than 60 % by 2050. Supplying large urban areas with high-quality drinking water and providing water resources in the long term is a major challenge (Jameel et al., 2016; Ehleringer et al., 2016). In Slovenia, drinking water supply is mainly based on groundwater (around 97 % of the drinking water supply is from groundwater resources) (Uhan & Krajnc, 2003) and in the capital city, Ljubljana, it provides an invaluable drinking water resource (Trček, 2017).

In Slovenia, only tritium and radon analyses are prescribed by drinking water legislation (Official Gazette, No. 74/15), however, if the parametric value for tritium is exceeded, it must be investigated to see if the cause is the presence of artificial radionuclides. Parametric values for specific basic ions, e.g., NO_3^- , SO_4^{2-} and trace elements, e.g., Se, Sb, Pb, Ni, Fe, Cu, Cd, Al, As, B in drinking water have also been established (Official Gazette, Nos. 19/04, 35/04, 26/06, 92/06, 25/09, 74/15, and 51/17), while the regular monitoring of stable isotopes of H, O in water and C and N in different compounds (e.g., HCO_3^- , NO_3^-)

is not required by legislation. Despite quite a large number of isotope analyses performed in the past, to date, there has been no comprehensive research in the use of environmental isotopes in urban water management systems in Slovenia.

Here, we review and synthesize past research involving $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ to advance our understanding of the groundwater characteristics of the Ljubljana aquifers, which can be used as the basis for future investigations. We focus on work conducted over the past 40 years. The main aims of this review were the following:

- make a synthesis of past urban hydrology investigations of the Ljubljansko polje and Ljubljansko barje aquifers with emphasis on the use of $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ until 2019;
- collect information about sampling (location, time, type of sampling site) and the analytical methods used;
- identify the main gaps in the previous investigations and propose future activities.

Site description

The two most important groundwater aquifers for the Slovenia capital Ljubljana and its surroundings are the Ljubljansko polje (LP) and Ljubljansko barje (LB) (Fig. 1). The two aquifers are separated by the Golovec, Grajski hrib and Rožnik hills (Fig. 1) (e.g., Vižintin et al., 2009; Janža, 2015).

Two rivers bound the LP aquifer (Fig. 1) – the Ljubljanica River to the south and the Sava River to the north (Jamnik et al., 2003; Ogrinc et al., 2018). Because of the high velocities (10 m/day) and quite plunder groundwater flow (3–4 m³/s), the quality of groundwater is good (Jamnik et al., 2003; Jamnik & Žitnik, 2020). Hydrological conditions in the area are characterized by strong interactions between surface water and groundwater and by the high velocities of groundwater flow and pollutant transport: that is, up to 20 m/day (Andjelov et al., 2005; Janža et al., 2005). The LP is located in the eastern part of the Ljubljana basin (Ljubljanska kotlina). It was formed by tec-

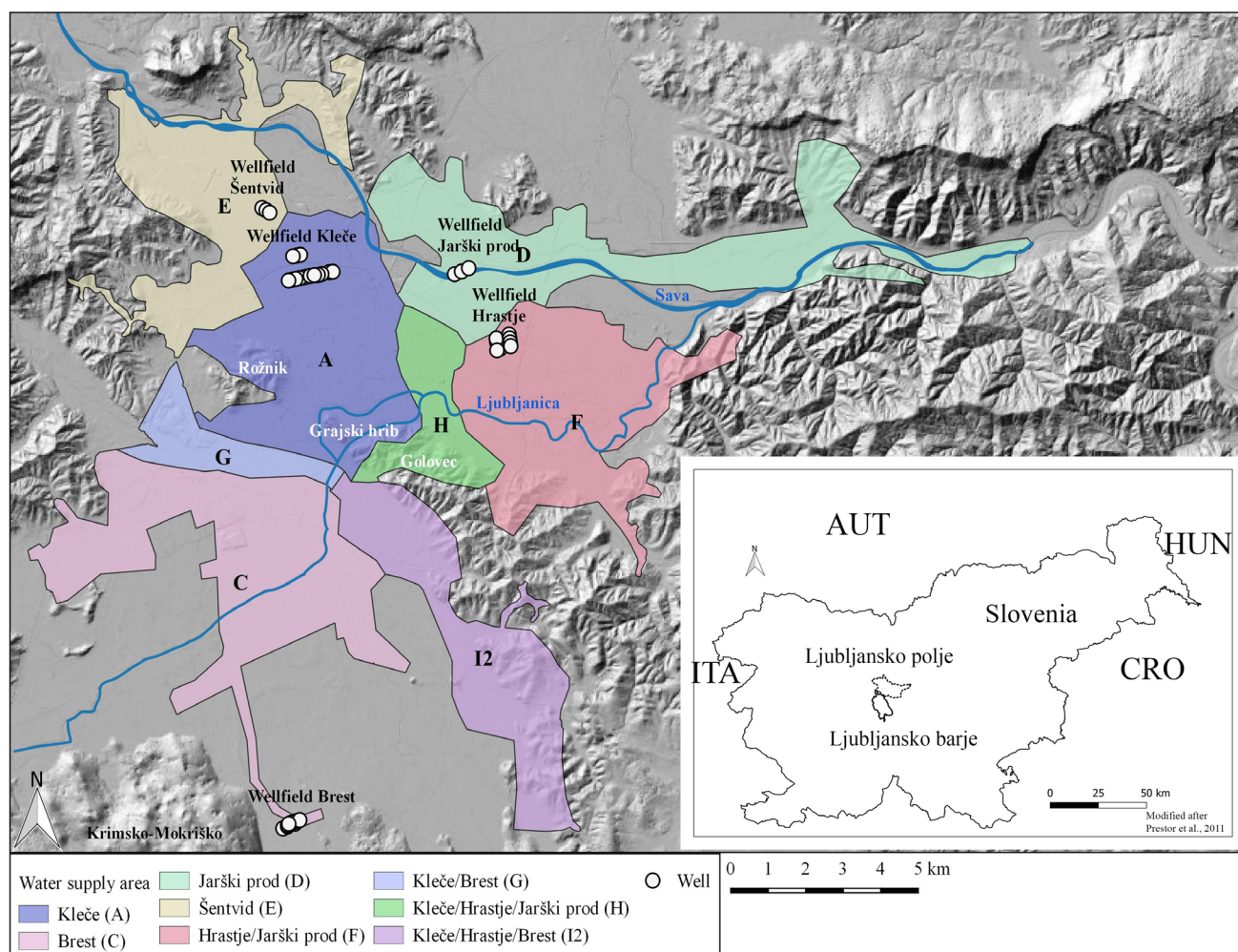


Fig. 1. Locations of the studied area with the main wellfields (Kleče, Hrastje, Brest, Jarški prod and Šentvid) and corresponding water supply areas in the Municipality of Ljubljana (wellfield Hrastje does not represent a unique water supply area). Source of topography: Geodetska uprava RS.

tonic subsidence in the early Pleistocene together with the main neotectonic fault system that runs in an east-west direction. The basin is composed of Permian and Carboniferous slate claystone and sandstone (Žlebnik, 1971). The Pleistocene and Holocene sediments, accumulated by the Sava River, form highly permeable of partially conglomerated sand and gravel.

The thickness of these fluvial sediments increases towards the centre of the LP, where it even exceeds 100 m (Andjelov et al., 2005). The aquifer system has an intergranular porosity, and an unconfined groundwater table, located on 20–25 m below the surface (Vrzel et al., 2018) and can fluctuate up to 10 m (source archive JP VOKA SNAGA d.o.o.). The main recharge of the aquifer comes from infiltration of precipitation and the Sava River, which recharge the aquifer mainly in its north-western part and drains the eastern part of the LP. The LP is also recharged via lateral inflow from the LB multi-aquifer system in the south (Jamnik et al., 2000; Vižintin et al., 2009; Vrzel et al., 2018) as well as from the Kamniško-Bistriško polje (Jamnik & Urbanc, 2000).

Groundwater is exploited at LP from four wellfields: Kleče, Hrastje, Jarški prod and Šentvid where drinking water is pumped from 16, 10, 3 and 3 wells, respectively (Fig. 1). Anthropogenic conditions of the aquifer are characterized by significant pressures of urbanization, industry, traffic, agriculture and old environmental burdens (Jamnik et al., 2012), which occur within the aquifer recharge area (Trček, 2017). To date, several different sources of pollutants have been detected and investigated. These include dispersed pollution sources where pollutants are consistently present (nitrates from agriculture and sewerage losses, new emerging contaminants in traces – pesticides from agriculture, plasticizers, corrosion and fire inhibitors, pharmaceuticals from sewage system losses (Jamnik et al., 2009) while others originate from past agricultural and industrial activities (atrazine, desethyl-atrazine, chromium (VI), trichloroethene, tetrachloroethene). Also, the characteristics of plumes and multipoint pollution contamination sources were recognized (Brilly et al., 2003; Karahodžič, 2005; Prestor et al., 2017).

The LB aquifer (Fig. 1) extends from the southern part of Ljubljana to the Krimsko-Mokrško hills. The Barje is a depression with a stone bedrock that consists in the southern,

western and central parts of Upper Triassic dolomite and Jurassic limestone, and in northern and eastern parts of Triassic and Permo-Carboniferous shaly mudstone, quartz sandstone and conglomerate, characterized by low hydraulic conductivity. The gravel fans are present on the borders of the basins (Mencej, 1988/89; Cerar & Urbanc, 2013). The basin was formed by a tectonic depression and filled by alluvial, marshy and lacustrine sediments during the Pleistocene and Holocene (Mencej, 1988/89). The Ljubljana River contributes to groundwater storage as well as the Krimsko-Mokrško hills (ARSO, 2012; Cerar & Urbanc, 2013). The wellfield at Brest (Fig. 1) is an important source of drinking water for the southern part of the city of Ljubljana (Bračič Železnik & Globevnik, 2014). It consists of 13 wells of different depths (Bračič Železnik, 2016). Water resources in the area are under significant pressure, and environmental problems include water pollution, increasing water demand, flood and drought risk, reduction in retention capacity, decreasing groundwater levels and terrain subsidence (Bračič Železnik & Globevnik, 2014). However, desethyl-atrazine represents the most severe problem for the further development of the Brest water source (Prestor et al., 2017).

The Ljubljana drinking water supply system

The central Ljubljana water supply system consists of five water supply facilities with altogether active 44 wells and more than 1,100 km long water supply network supplying 330,000 users through 43,000 connections. Water supply network includes different objects (i.e., reservoirs, water treatment locations, pumping stations) (Jamnik & Žitnik, 2020). In the central system, some settlements are continuously supplied with drinking water from a single wellfield (water supply areas A, C, D and E in Fig. 1), and others from two or more wellfields (water supply areas F, G, H and I2 in Fig. 1), depending on water consumption and pressure conditions in the system. Wellfield Hrastje (B) does not represent a unique water supply area (Jamnik & Žitnik, 2020).

The water from the wells is pumped directly to consumers or a reservoir for the short-term, from where it is distributed to the users. Water disinfection devices are built-in into the system; however, water does not undergo technical treatments. It is only chlorinated occasionally. For the Brest wellfield UV disinfection is used (Jamnik & Žitnik, 2020).

Methods

Studies related to the characterization of aquifers important for the domestic water supply in the municipality of Ljubljana were reviewed, with a focus on those studies that used $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values for the characterization of water sources.

Study selection criteria

First, we considered articles and reports related to the water cycle and domestic water supply investigations for the LP and LB published from 1976 to the present (Fig. 2). In the scope of the review, a comprehensive search of journals was completed based on several keywords related to the Ljubljana aquifers (Ljubljana/Ljubljansko polje, Ljubljansko barje, Ljubljana groundwater, Ljubljana water, Ljubljana water supply). The search included all studies containing information about i) sampling, ii) analytical methods, iii) the parameters determined, and iv) isotope data.

In the second step, we focused on studies reporting the use of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ to measure, describe or establish the characteristics of the LP and LB aquifers. Additionally, we also collected studies involving $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$. Articles on the modelling of LP and LB and other groundwater parameters, e.g., toxic metals in the groundwater and spring waters, electrical conductivity, and pharmaceuticals, and the quantity and quality conditions of groundwater in the Ljubljana aquifers were beyond the scope of this review (Fig. 2).

Search methods

The databases were searched for relevant literature published before November 2019 and included Google, Google Scholar, Science Direct, Co-operative Online Bibliographic System, and Service – COBISS. Included were national and international journals, conference papers, PhD and Master Theses, reporting data on $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in an urban water system, precip-

itation, and the Sava River. Also, the reference section of the articles was searched to identify additional sources. We also inspected the working reports for JP VOKA SNAGA d.o.o. available at Jožef Stefan Institute (JSI) including isotope data. Studies published in both Slovene and English were considered.

Information about i) sampling including location coordinates, type of sampling location (groundwater, spring water, precipitation, river) and sampling period; ii) the analytical methods used for $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ analysis, and iii) $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ data were collected and summarised.

Results and discussion

The initial combined search retrieved 102 records (Fig. 2). After removing 41 non-relevant records, the 61 articles remaining were assessed for eligibility. Of these, 24 records were used to summarize site characteristics, while 41 records containing $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ data (Table 1) were reviewed in detail. Some articles were used in both categories. Information about sampling is summarised in subchapter *Sampling*, followed by *Analytical methods used for determining $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$* . Finally, a summary of the isotope research and the important findings relating to the Ljubljana aquifers is presented.

Sampling

Information collected about the sampling area, sampling locations and type of samples collected in different investigations for isotope analysis is presented in Table 1. Isotope investigations of groundwater were first performed in 1976 at LB (Breznik, 1984) while groundwater and surface water investigations at LP and on the Sava River in Tacen began in 1997 (Urbanc & Jamnik, 1998). The isotope composition of precipitation in Ljubljana has been regularly monitored since 1981 (Pezdič, 1999; Vreča et al., 2008).

At the LP, many investigations were performed at the wellfield Kleče, followed by the wellfields Hrastje, Jarški prod, and Šentvid (Fig. 1, Table 1). Short-term studies were performed at the borehole LMV-1 (located close to the wellfield Kleče). In contrast, long-term investigations were performed in the area of Union Brewery (Table 1). In LB, sampling was mainly conducted in the wellfield Brest (Table 1). Surface waters (e.g., Curnovec, Gradaščica) were also sampled (Urbanc & Jamnik, 2002). On the Sava River, sampling was performed at Tacen, Brod, Črnuče, Šentjakob and Dolsko (see references in Table 1). The Jožef Stefan

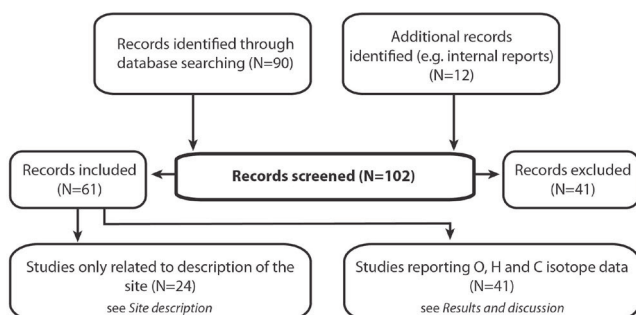


Fig. 2. Flowchart of study selection for detail review synthesis.

Table 1. The list of references related to the isotope investigations performed in the area of Ljubljansko polje (LP), Ljubljansko barje (LB), the Sava River (RS), and precipitation (P). Source of reference: * archive of the JP VOKA SNAGA d.o.o., ** archive of JSI. (GW = groundwater, P = precipitation, SF = surface water, TW = tap water, VD = well).

Reference	Parameter	Sampling area	Type of sample	Location
Breznik, 1984*	$\delta^{18}\text{O}$	LB	GW	Brest
Pezdič, 1998	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$	LB	P, GW	The southern part of LB
Krajcar Bronić et al., 1998	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$	LP	P	Ljubljana
Urbanc & Jamnik, 1998	$\delta^{18}\text{O}$	LP, RS	GW, SW, P	RS (Tacen), Mostec, Nadgoriški potok, Kleče (V-4, V-6, V-8a, V-11, V-12, V-14, V-15), Šentvid (V-2a), Jarski prod (V-1, V-3), Hrastje (V-1a, V-5, V-8), precipitation-Kleče
Pezdič, 1999	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$	Ljubljana	P	Ljubljana Bežigrad
Jamnik & Urbanc, 2000	$\delta^{18}\text{O}$	LP, RS	GW	Kleče (VIIIa and XII), Hrastje (Ia and V)), Šentvid (IIa) and Jarski prod (I, III), groundwater level stations, precipitation station
Urbanc & Jamnik, 2002	$\delta^{18}\text{O}$	LB	GW, SW	Mostec, Gradašica, Ljubljana, Curnovec, Holocen aquifer (V-1, V-7, V-9, V-10, V-12, V-13, IS-6pl, IS-7, IS-8, DBP-2, DBP-4, DBP-5, DBP-6, DBP-9) Upper Pleistocene aquifer (IŠ-6gl, OP-1, PB-2gl, PB-4, PB-6gl, G-12, PB-1gl, VD-4gl, DBG-2, DBG-4, DBG-5, DBG-6, DBG-9) Lower Pleistocene aquifer (TB-3, B-1, PB-5gl, P-19gl, A-1gl, A-2gl, IŠ-4gl).
Jamnik & Urbanc, 2003	$\delta^{18}\text{O}$	LP, LB	GW, P, SW	LP and LB, GeoZS, RS (Tacen)
Pezdič, 2003	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$	Ljubljana	P	Ljubljana – Bežigrad, Ljubljana – JSI
Andjelov et al., 2005	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$	LP	GW, SW, P	Nadgoriški potok, Mostec, RS, wells in Kleče (4, 6, 8a, 11, 12, 14, 15), Hrastje (1a, 5, 8), Jarski prod (1, 3), Šentvid (2a)
Brenčič & Vreča, 2005	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	LP	GW (bottled)	Union Brewery
Trček, 2005	$\delta^{18}\text{O}$, ($\delta^2\text{H}$)	LP	GW, P	Lysimeter Union Brewery
Vreča et al., 2005	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$	Ljubljana	P	Ljubljana – JSI, Ljubljana – Reaktor
Brenčič & Vreča, 2006	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$	LP	GW (bottled)	Union Brewery
Trček, 2006	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$	LP	GW, P	Piezometer Union Brewery
Vreča et al., 2006	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$	Ljubljana	P	Ljubljana – JSI, Ljubljana – Reaktor
Kanduč, 2006	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	LP, RS	SW, GW	RS (Brod, Sava Dolsko), LP (Yulon, Hrastje1a, Kleče, vodnjak 17, GeoZS, Kleče 11, Šentvid 2A, Kleče 8a, Hrastje 3, Navje, Petrol - Šmartinska cesta, L.P.Vodovodna, HMZ Hrastje)
Brenčič & Vreča, 2007	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	LP	GW (bottled)	Union Brewery
Ogrinc et al., 2008	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$	RS	SW, P	RS (Tacen, Dolsko), Ljubljana – Bežigrad, Ljubljana – JSI, Ljubljana – Reaktor
Vreča et al., 2008	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$	Ljubljana	P	Ljubljana – Bežigrad, Ljubljana – JSI, Ljubljana – Reaktor
Brenčič & Vreča, 2010	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	LP	GW (bottled)	Union Brewery

Vreča et al., 2011**	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	LB	GW, SW	V-1A, V-2A, V-3A, V-4A, V-5, V-7, V-8, and V-9, P-23/10
Brenčič, 2011*	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	LB	GW, SW	V-1A, V-2A, V-3A, V-4A, V-5, V-7, V-8, and V-9, P-23/10
Urbanc et al., 2012	$\delta^{18}\text{O}$	LP, LB	GW, SW	VD Kleče (4, 8a, 11, 14, 17), VD Hrastje (1a, 3), VD Brest (1, 1a, 2a, 3, 4a, 5, 7, 9), VD Jarški prod (1, 3), VD Šentvid (1a)
Cerar & Urbanc, 2013	$\delta^{18}\text{O}$	LP, LB	GW, SW, P	LP aquifer, the northern part of LB, the middle part of LB, the southern part of LB – Brest and Iški Vršaj, GeoZS
Vreča et al., 2013**	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	LB	GW	VD-3a
Mezga, 2014	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	LP	GW	LMV-1
Mezga et al., 2014	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$	LP	GW	LMV-1
Vreča et al., 2014	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$	Ljubljana	P	Ljubljana – Reaktor
Vreča et al., 2015**	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	LB	GW	VD-3a
Vreča & Malenšek, 2016	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$	LP	P	Ljubljana – Bežigrad, Ljubljana – JSI, Ljubljana – Reaktor, Kleče
Trček, 2017	$\delta^{18}\text{O}$, ($\delta^2\text{H}$)	LP	GW, P	Union Brewery
Bračič Železnik et al., 2017	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	LB	GW, SW	VD Brest-3a
Vrznel et al., 2018	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$	LP, RS	GW, SW, P	RS (Šentjakob), Kleče (8, 11, 12), Hrastje (3, 8), Jarški prod (1, 3), Ljubljana – Reaktor, GeoZS
Ogrinc et al., 2018	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$	RS	SW	RS (Dolsko)
Vreča et al., 2019a**	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$	LP, LB, RS	GW, SW, TW	VD Kleče (2, 3, 4, 6, 7, 8a, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17), VD Hrastje (1a, 2, 2a, 3, 4, 5, 6, 7, 8), VD Brest (1, 2, 2a, 3, 4, 4a, 5, 6, 7, 8, 9), Jarški prod (1, 2, 3), VD Šentvid (1a, 2a, 3), joint exits from water pumping stations, reservoirs, drinking water fountains, tap water in public and private buildings, RS (Šentjakob, Črnuče, Brod)
Vreča et al., 2019b	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	LB, LP, RS	GW, SW, TW	VD Kleče (2, 3, 4, 6, 7, 8a, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17), VD Hrastje (1a, 2, 2a, 3, 4, 5, 6, 7, 8), VD Brest (1, 2, 2a, 3, 4, 4a, 5, 6, 7, 8, 9), Jarški prod (1, 2, 3), VD Šentvid (1a, 2a, 3), joint exits from water pumping stations, reservoirs, drinking water fountains, tap water in public and private buildings, RS (Šentjakob, Črnuče, Brod)
Vreča et al., 2019c**	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$	LB, LP	TW	Vrtec Miškolin enota Zajčja Dobrava; Vrtec Pedenjped, enota Zadvor; Vrtec Visji gaj, enota Kozarje
Vreča et al., 2019d**	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$	LB, LP	TW	Bencinski servis Agip; Vrtec Hansa Christiana Andersena, enota Marjetica; Vrtec Vodmat; Vrtec Mladi rod, enota Kostanjčkov vrtec; Vrtec Mojca, enota Rozle; OS IG – podružnica Iška vas
Vreča et al., 2019e**	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	LB	GW	Tap water at location Jože Stefan Institute
Vreča et al., 2019f**	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	LB	GW	PB – 24b/19
				PB – 24a/19, PB – 24c/19

Institute (JSI) has recorded the isotope composition of precipitation since 1981. Samples of precipitation were first collected at the synoptic station Ljubljana–Bežigrad located at the Hydrometeorological Survey of Slovenia (today Slovenian Environment Agency – ARSO), later at the JSI (station Ljubljana–JSI) and finally at the Reactor Centre of the JSI (station Ljubljana–Reaktor) (Pezdič, 2003; Vreča et al., 2006; Vreča & Malenšek, 2016). Precipitation was collected for a short period in the areas of wellfield Kleče, Union Brewery and at Geological Survey of Slovenia (GeoZS) (see references Table 1).

The first stable water isotope survey of tap water in Slovenia, according to our best knowledge, was performed in 2014 (Vreča et al., 2019c). In this survey, tap water samples were collected for O and H isotope analysis at 105 locations around Slovenia, nine of them at locations in Ljubljana and its vicinity (Vreča et al., 2019c).

To assess the usefulness of environmental isotopes, scientists have been performing systematic monitoring of the Ljubljana drinking water supply system since 2018. The first detailed sampling campaign was carried out between 06/09/18 and 29/11/18 at 103 locations; 41 wells in five water supply facilities, seven joint exits from the water pumping station, 22 reservoirs, two water treatment locations, 13 fountains, and 19 taps (see Table 1). In addition, samples were collected on the Sava River at Brod, Črnuče and Šentjakob (Vreča et al., 2019a; Vreča et al., 2019b). The first 24-hour experiment was performed in the basement of the main building at the Jožef Stefan Institute in Ljubljana with emphasis on the hourly isotope variability of tap water in April 2019 (Vreča et al., 2019d).

From Table 1, the following sampling locations were identified:

- **Wellfields** – Kleče (11 wells), Hrastje (5 wells), Brest (12 wells), Jarški prod (2 wells), and Šentvid (1 well)
- **The Sava River** – five locations: Brod, Črnuče, Dolsko, Šentjakob and Tacen
- **Precipitation** – six locations: synoptic station Ljubljana–Bežigrad, JSI–Ljubljana, Ljubljana–Reaktor, Union Brewery, wellfield Kleče, and GeoZS
- **Other locations** – piezometers and spring water from the LB, lysimeter and piezometers at Union Brewery, groundwater in LMV-1, tap water and different objects of the drinking water supply system.

Analytical methods used for determining stable oxygen, hydrogen and dissolved inorganic carbon isotope composition

Results of $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ were reported relative to VSMOW (e.g., Urbanc & Jamnik, 1998; Brenčič & Vreča, 2006; Vrzel et al., 2018), while $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ was reported relative to the VPDB (e.g., Brenčič & Vreča, 2006; Kanduč, 2006; Vreča et al., 2019e). Isotope ratio mass spectrometers (IRMS) were used for the determination of $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in water except for some precipitation samples collected at the Ljubljana–Reaktor which were measured by off-axis integrated cavity output laser spectroscopy, OA-ICOS (Vreča et al. 2017).

Oxygen isotope composition ($\delta^{18}\text{O}$) is reported in 40 records (Table 1). In all past investigations, the authors reported that the $\delta^{18}\text{O}$ was determined by the water- CO_2 equilibration technique (Epstein & Mayeda, 1953; Avak & Brand, 1995) using different IRMS, namely the dual inlet Varian Mat 250 at the JSI (Pezdič, 1998; Urbanc & Jamnik, 1998; Jamnik & Urbanc 2000; Andjelov et al., 2005; Vreča et al. 2005; 2006; 2008; Ogrinc et al., 2008), Finnigan DELTA^{plus} at the Joanneum Research (JR) in Graz, Austria (Brenčič & Vreča 2006; Trček, 2017), Finnigan MAT 250 at the Hydroisotop GmbH laboratory in Schweitenkirchen, Germany (Cerar & Urbanc, 2013; Mezga et al., 2014; Mezga, 2014; Vreča et al., 2015), and a continuous flow IsoPrime (GV Instruments) at the JSI (Bračič Železnik et al., 2017; Ogrinc et al., 2018; Vrzel et al., 2018; Vreča et al., 2014). Trček (2005; 2006) reported that analysis was performed at the Institute of Groundwater Ecology (GSF) in Neuherberg, Germany, but does not state the type of IRMS used for the analysis. The $\delta^{18}\text{O}$ analysis of precipitation collected by the JSI at the Ljubljana–Reaktor was performed from February 2007 to the end of 2014, using a continuous flow IRMS IsoPrime (GV Instruments) connected to equilibration system MultiFlow Bio (Vreča et al., 2014). Samples collected since 2015 were measured on a dual inlet Finnigan MAT DELTA^{plus} with CO_2 - H_2O equilibrators HDOEQ48 (Vreča et al., 2019a; 2019b; 2019d; 2019e; 2019f).

Hydrogen isotope composition ($\delta^2\text{H}$) is reported in 32 records using different analytical methods, which included H_2 generated by the reduction of water over hot zinc (Pezdič, 1999), H_2 equilibrated with the water samples using a Pt-catalyst (Horita et al., 1989), reduction on Cr at 800 °C (Gehre et al., 1996; Morrison et al., 2001) or with an OA-ICOS (Wassenaar et al., 2014). Measurements were performed on different IRMS including a dual inlet Varian Mat

250 at the JSI (Pezdič, 1998; Vreča et al., 2005; 2006; 2008; Ogrinc et al., 2008; 2018; Vrzel et al., 2018), Finnigan DELTA^{plus} XP at the Joanneum Research (JR) in Graz, Austria (Brenčič & Vreča, 2006; Vreča et al., 2014; Trček, 2017), Finnigan MAT 251 at the Hydroisotop GmbH laboratory in Schweitenkirchen, Germany (Vreča et al., 2011; 2013; 2015; Mezga et al., 2014; Bračič Železnik et al., 2017). Samples collected from 2015 onwards were measured on the dual inlet Finnigan MAT DELTA^{plus} with CO₂-H₂O equilibrators HDOEQ48 at the JSI (Vreča et al., 2019a; 2019b; 2019d; 2019e; 2019f). Some precipitation samples collected at the Ljubljana-Reaktor were measured at the Isotope Hydrology Laboratory at the International Atomic Energy Agency (IAEA) on a Los Gatos Research OA-ICOS (Vreča et al. 2017).

The carbon isotope composition in the dissolved inorganic carbon ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$) is reported in 13 records and was determined using CO₂ collected after the reaction of the water sample with 100 % H₃PO₄ on a continuous flow Europa 20-20 IRMS with ANCA-TG separation module for trace gas analysis (Brenčič & Vreča, 2005; 2007; 2010; Mezga, 2014; Vreča et al., 2019a) or a continuous flow IsoPrime or IsoPrime 100 IRMS with equilibration system MultiFlow Bio at the JSI (Brenčič, 2011; Bračič Železnik et al., 2017; Vreča et al., 2011; 2013; 2015; 2019e; 2019f).

Only a few articles reported the analytical errors (Trček, 2005; 2006; Brenčič & Vreča, 2006; 2007; Ogrinc et al., 2008; 2018; Vreča et al., 2008; 2018; Cerar & Urbanc, 2013; Mezga et al., 2014). Most publications report basic descriptive statistics or isotope ranges and only in a few cases, whole datasets are publicly available (e.g., Brenčič & Vreča, 2006; 2007; Vreča et al., 2008; 2014; Vrzel et al., 2018).

History of the stable isotope research in the catchment area of Ljubljana aquifers

Here we present a summary of the 41 records (Table 1) related to the past stable isotope investigations in the area of LP and LB aquifers. Articles usually report the use of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in water resources investigations; however, it is interesting, that the $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ was determined in only 13 records.

Ljubljansko barje

The first isotope investigations in the area of Ljubljana aquifers were performed in 1976 (Breznik, 1984), as part of the hydrological research into the Brest wellfield between 1974 and 1976. Water samples were collected at the LB

aquifer, from the Iška River and other springs in the vicinity. No precise sampling locations with coordinates were reported, and no information was given about the collection of the samples or where the analyses were performed. They reported values for $\delta^{18}\text{O}$ between -9.94 and -8.90 ‰ and -65.8 and -58.9 ‰ for $\delta^2\text{H}$. From the tritium isotope data, Breznik (1984) concluded that the recharge rate of the lower aquifer is very low.

Samples from the southern part of LB were collected in early spring and autumn in 1993. Nineteen sampling points for groundwater and river base flow measurements were established for the determination of groundwater recharge and storage capacity (Pezdič, 1998). Unfortunately, the sampling locations are presented only graphically, and the author gives no exact coordinates or location names. Precipitation was collected in Ljubljana for the determination of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ values. Pezdič (1998) reported $\delta^{18}\text{O}$ values of springs and surface river water of -9.65 and -8.82 ‰, while $\delta^2\text{H}$ values ranged from -67.4 to -61.2 ‰. The weighted means of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in precipitation for the year 1993 were -8.07 ‰ and -55.6 ‰, respectively. The author concluded that the contribution of local precipitation was small and infrequent; however, local precipitation could recharge nearby aquifers (Pezdič, 1998).

After 1997, Urbanc & Jamnik (2002) performed more detailed investigations of the LB in which the chemical and isotope composition of groundwater was studied. Isotope investigations combined with hydrogeochemical methods were used to obtain hydrogeological data on the properties of water in individual aquifers: the Holocene aquifer and the upper and the lower Pleistocene aquifers. The authors, however, do not provide any sampling information or at which institute the analyses were conducted. Also, location names are shown only on maps. Surface water and groundwater in wells, piezometers and boreholes (Table 1) were sampled between November 1999 and February 2002. The authors report mean values for $\delta^{18}\text{O}$ in surface waters and based on the isotope data, the mean altitude of individual water recharge areas (exact numbers were not provided). The $\delta^{18}\text{O}$ values of groundwater in the Holocene aquifer were -8.9 to -8.6 ‰, -9.6 to -8.6 ‰ in the upper Pleistocene aquifer, and -9.5 to -9.2 ‰ in the lower Pleistocene aquifer. Again, values were mainly presented graphically, and numerical values were given only for the lower Pleistocene aquifer (Urbanc & Jamnik, 2002).

Since 2010, many isotope investigations at wellfield Brest were performed. In 2011, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$

and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values were determined in water samples collected during a pumping test from a 200 m deep well (VD Brest-3a) to determine the recharge dynamics, origin and age of groundwater in the dolomite. The investigation began on the 23/05/11 when a step-test was performed, followed by a one-month-long pumping test. In the third step, the rising of water was investigated. Testing finished on 24/06/11 (Brenčič, 2011). The $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ were also determined in seven wells at Brest and in one observation well (P-23/10). The values of $\delta^{18}\text{O}$ ranged between -9.98 and -9.61 ‰ and $\delta^2\text{H}$ between -64.9 and -61.1 ‰. $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values were between -12.8 and -11.8 ‰. The isotope composition of springs near wellfield Brest was also determined. Isotope values were between -9.56 and -6.21 ‰ for $\delta^{18}\text{O}$, between -64.4 and -58.8 ‰ for $\delta^2\text{H}$ and between -9.42 and -18.65 ‰ for $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (Brenčič, 2011). By performing the pumping test, mixing of water from different aquifers, namely, shallow water from the upper Holocene aquifer and a lower Pleistocene aquifer in well VD Brest-3a, was confirmed. A certain amount of deep-water was also present; however, the exact amount was unknown, and its characteristics were not determined. The isotope composition of the water also varied during the pumping test, indicating that the fraction of water of different origin had changed (Brenčič, 2011; Vreča et al., 2011; Bračič Železnik et al., 2017). In 2013 (from 21/05/13 to 31/05/13), the pumping test was repeated in well VD Brest-3a. The $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values ranged from -9.46 and -9.05 ‰, -65.9 and -63.4 ‰, and -14.5 and -12.3 ‰, respectively (Vreča et al., 2013; Bračič Železnik et al., 2017).

In 2015, another pumping test in well VD Brest-3a was performed and the $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values varied between -9.78 and -9.06 ‰, -65.4 and -61.4 ‰ and -12.05 and -11.14 ‰, respectively. The sampling test lasted from 05/06/15 to 01/07/15 (Vreča et al., 2015). In 2019, few additional 24-hour pumping tests were performed (Table 2).

To conclude, the data shows a broad range of $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values in groundwater in the LB. Historically, isotope investigations were rare. In the last years, the $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ are used more often but still sporadic. Also, different wells in the wellfield Brest yield different isotope compositions. This variation is because the depths of the wells are not consistent, and the groundwater is captured from different aquifers. Therefore, careful consideration about how to implement isotope techniques in the future is needed for better water resource management of the wellfield Brest.

Ljubljansko polje

According to available data, isotope investigations of groundwater from the LP were not performed until 1997. The first samples were collected between October 1997 and September 1998 at 13 pumping wells in the wellfields Kleče, Hrastje, Jarški prod and Šentvid (Urbanc & Jamnik, 1998). Samples were collected only for $\delta^{18}\text{O}$ analysis. A more extensive set of observations (October 1997 to September 1999) is presented by Andjelov et al. (2005). From this data, the authors estimated the proportion of locally infiltrated precipitation and water from the Sava River, but only reported the mean values of all measurements obtained during the sampling period for selected wells. Reported $\delta^{18}\text{O}$ values in the groundwater were between -9.0 and -8.6 ‰ in Kleče (7 wells), -9.1 and -9.0 ‰ in Jarški prod (2 wells), and -8.9 and -8.8 ‰ in Hrastje (3 wells). In Šentvid, the mean value of several measurements from a single well was -8.8 ‰ (Urbanc & Jamnik, 1998). However, from the figures, it is possible to read the values for specific wells for the entire sampling period (Urbanc & Jamnik, 1998; Jamnik & Urbanc, 2003; Andjelov et al., 2005). At the same time, samples from the Sava River at Tacen were collected (Jamnik & Urbanc, 2003). The results, although only shown graphically, confirmed the influence of human activities on groundwater quality in

Table 2. $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ results (minimum to maximum values) of the sampling performed in 2019 during 24-hour pumping tests. (TA = total alkalinity, EC = electrical conductivity)

Date of sampling	Name	Parameters identified	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	Reference
09/04/19-10/4/19	PB-24b/19	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, TA, EC, ^3H , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	-9.59 to -9.50 ‰ (N=10)	-63.9 to -63.1 ‰ (N=10)	-11.1 ‰ (N=2)	Vreča et al., 2019e
02/9/19-03/09/19	PB-24a/19	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, TA, EC, ^3H , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	-9.49 to -9.42 ‰ (N=3)	-62.8 to -62.5 ‰ (N=3)	-11.4 to -11.1 ‰ (N=3)	Vreča et al., 2019f
03/10/19-04/10/19	PB-24c/19	$\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$, TA, ^3H , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and EC	-9.50 to -9.48 ‰ (N=3)	-62.9 to -62.3 ‰ (N=3)	-11.2 to -10.9 ‰ (N=3)	Vreča et al., 2019f

those wells where the recharge zone extends under the city (Urbanc & Jamnik, 1998).

In July and October 2003, the Institute for Public Health in Maribor collected samples at following locations: Yulon, Hrastje 1a, Kleče 17, GeoZS, Kleče 11, Šentvid 2A, Kleče 8a, Hrastje 3, Navje, Petrol- Šmartinska cesta, L.P. Vodovodna, HMZ Hrastje, for the $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ and alkalinity measurements. The $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values were ranged from -14.7 to -12.2 ‰. The $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ results from LP were graphically presented in Kanduč (2006), together with $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values of samples from the Sava River to indicate possible biogeochemical processes in the groundwater-river water system.

From March 2010 to December 2011, monthly samples were collected for $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ analyses from seven wells at three wellfields: Kleče, Hrastje, and Jarški prod, and from the Sava River at Šentjakob (Vrzel et al., 2018). Based on $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ results, the authors determined the proportion of the Sava River in groundwater resulting from periods of low and high precipitation in 2010 and 2011. Numerical values are reported in the *Supplementary Data* and are presented here as a box plot (Fig. 3). The authors found that both sources directly influence the groundwater: infiltration of local precipitation and recharge from the Sava River. Based on average $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ values, it was apparent that groundwater from Kleče 11, Hrastje 3, and Hrastje 8 contained only a low amount of the Sava River water (up to 14 %) and was mostly composed of recently infiltrated local precipitation. For comparison, a higher percentage of the Sava River water (up to 86 %) is present in the groundwater in wells Jarški prod

1, Jarški prod 3, Kleče 8 and Kleče 12. Findings were similar to that reported by Urbanc & Jamnik (1998).

More detailed investigations (from 2000 to 2014) in LP were performed in the area of Union Brewery where groundwater in Pleistocene fluvial sediments and the lower gravel aquifer is exploited by the Brewery (Trček 2005; 2006; 2017). The Union Brewery’s lysimeter was ideal for studying urban water infiltration and to make accurate measurements of water flow and water balance parameters. It consisted of 42 boreholes drilled into the right and left walls of the construction (Juren et al., 2003; Trček, 2005). As part of its sustainable groundwater management plan, extensive studies of groundwater flow and solute transport were performed from 2003 to 2014 to predict groundwater flow and contaminant transport through the unsaturated and saturated zone of the urban intergranular aquifer (Trček, 2017).

Actual stable isotope monitoring began in July 2003 (Trček, 2005) with the aim to obtain information about mixing processes and groundwater residence times in the unsaturated zone and to determine the risk of contamination of drinking water. From July 2003 to August 2004, monthly groundwater samples were collected, and $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ values determined. Trček (2005) reported $\delta^{18}\text{O}$ groundwater values between -14.7 ‰ and -4.5 ‰. All other $\delta^{18}\text{O}$ values were presented as boxplots, and no values for $\delta^2\text{H}$ are reported. A synthesis of one-years’ worth of data revealed two types of flow: lateral flow, which has an essential role in the protection of groundwater of

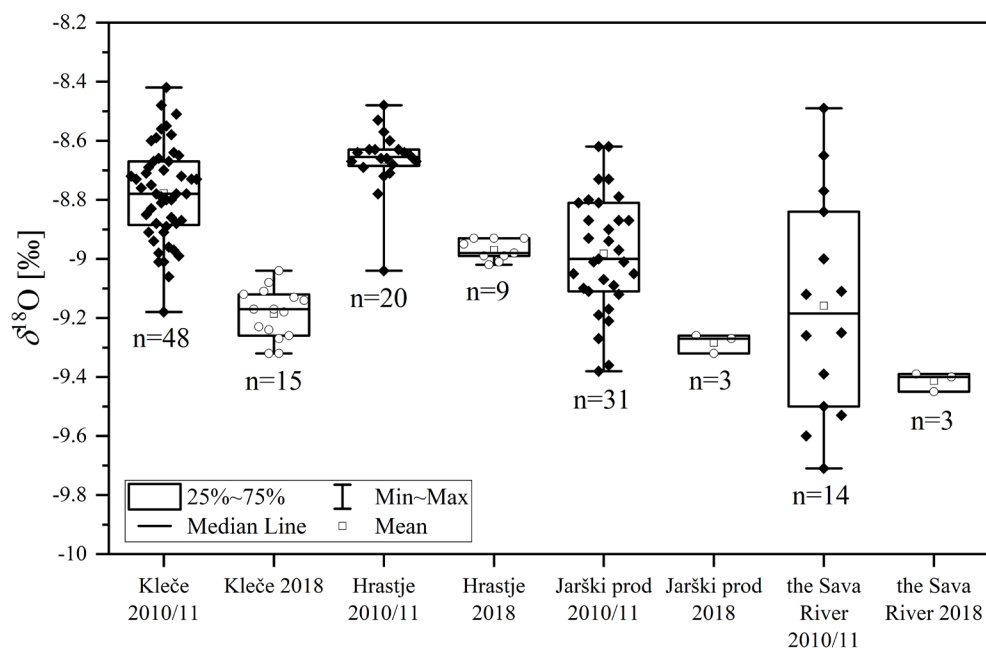


Fig. 3. Box plots of $\delta^{18}\text{O}$ values taken from Vrzel et al., 2018 (period 2010/2011) and from research performed in autumn 2018 for wells in Kleče, Hrastje, Jarški prod and the Sava River (Vreča et al., 2019a; 2019b).

the Pleistocene alluvial gravel aquifer, and vertical flow, which is the main factor controlling contaminant transport towards the saturated zone (Trček, 2005).

From July 2003 to June 2004 and from July 2004 to June 2005, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ values in 16 observation wells (piezometers) were measured next to the Union Brewery. The mean values from a single sampling site for $\delta^{18}\text{O}$ varied between -9.21 and -8.70 ‰ (Trček, 2006). During the same period (from July 2003 to June 2005) monthly oxygen isotope measurements of groundwater (lysimeter) ranged from -14.7 to -4.4 ‰, while the means of single sampling points were between -10.7 and -8 ‰ (Trček, 2005). In 2017, Trček published the results of the 2004 to 2014 investigation (Trček, 2017). Water samples were collected daily, weekly or at monthly intervals, although only seasonal monitoring was performed after 2010. Samples were collected from 18 observation points on the right side of the Union Brewery lysimeter, while precipitation was collected near the entrance to the lysimeter. The $\delta^{18}\text{O}$ values in groundwater from 2004 to 2010 ranged from -16 to -6 ‰. In precipitation, $\delta^{18}\text{O}$ values ranged from -18 to -3 ‰. Trček studied the weighted averages of the lysimeter water $\delta^{18}\text{O}$ values for the period 2005–2009 to get a better insight into the lysimeter drainage system. Reported values varied between -9.82 and -7.62 ‰. Again, Trček emphasised the importance of lateral flow and that the goal for future investigations should be directed towards vertical transport studies of contaminant loads (Trček, 2017).

The Union Brewery also produces bottled water, both still and flavoured water, which is sold under the Zala brand. In September 2004, extensive research of the general chemistry, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of bottled waters available on the Slovene Market was undertaken (Brenčič & Vreča, 2005; 2006; 2007; 2010). The authors reported that $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values of still water were between -61 and -60 ‰, -8.90 and -8.95 ‰ and -12.7 and -12.3 ‰, respectively. For flavoured waters, values for $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ ranged between -61 and -59 ‰, -8.95 and -8.80 ‰, and -13.5 and -12.5 ‰ (Brenčič & Vreča, 2006; 2007).

Isotope investigations of groundwater were also performed at the pumping station LMV-1 (located near the Kleče wellfield) from 2009 to 2011 (Mezga, 2014). The three-year sampling campaign covered three annual season cycles: groundwater at each sampling location was sampled twice, in spring (March–July) and autumn (August–November). The samples were collected

as part of an extensive survey looking at the origin of groundwater in Slovenia. For the LMV-1, the authors reported mean values of $\delta^{18}\text{O}$ of -8.59 ± 0.33 ‰, $\delta^2\text{H}$ of -60.4 ± 0.6 ‰ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of -12.7 ± 1.3 ‰ (Mezga et al., 2014).

Ljubljansko polje and Ljubljansko barje simultaneous investigations

Simultaneous isotope investigations of both aquifers are rare. Cerar & Urbanc (2013) studied their interactions during two sampling campaigns in autumn 2010 and spring 2011. They aimed to obtain a better understanding of how the aquifers interact in order to improve a hydrogeological conceptual model of the aquifers. In total, they collected 138 samples at 69 locations from 28 wells from the five main wellfields, five industry wells, two private wells, 29 boreholes, and five samples of surface water. Based on the hydrogeological and the geographical position of the aquifers they divided LB into three areas: the northern part, middle part and southern part, including the area of Brest and Iški vršaj (Cerar & Urbanc, 2013). The $\delta^{18}\text{O}$ in the groundwater of the northern part of LB varied between -9.0 and -8.6 ‰. Groundwater from this part of the aquifer is enriched in ^{18}O isotope compared to the other parts of the aquifers. This enrichment is due to the higher influence of local precipitation on the open aquifer. $\delta^{18}\text{O}$ values in the middle part of the aquifer were from -10.0 to -9.1 ‰, while $\delta^{18}\text{O}$ values in the southern part (including Brest and Iški vršaj) were -9.6 to -9.2 ‰. In their final report, Urbanc et al. (2012) report the range of $\delta^{18}\text{O}$ values for groundwater from Brest to vary between -9.6 and -9.4 ‰ (tabulated values not given). For LP, $\delta^{18}\text{O}$ values in Kleče wells varied from -9.1 to -8.7 ‰, -8.9 to -8.8 ‰ in Šentvid, -8.9 to -8.8 ‰ in Hrastje, and from -9.3 to -9.0 ‰ in Jarški prod.

Jamnik & Urbanc (2000) were the first to study the connections between LB and LP. They found that LP is partially recharged with groundwater from LB. However, Cerar & Urbanc, (2013) also showed that based on the hydrochemical composition (Ca/Mg molar ratio and HCO_3^- concentration) of water, the contribution of groundwater from LB is of minor importance. The minimal contribution was detected near the boundary between the two aquifers. By measuring tritium activity, they classified groundwater in LP as “modern waters” with a residence time of up to 10 years, at the interface between the aquifers as “submodern waters” with a residence time of more than 50 years and in LB as “older waters” with residence time between 10 and 50 years.

However, increased tritium activities also indicated “bomb tritium” from nuclear experiments in the 1960s (Cerar & Urbanc 2013). Vrzel et al. (2018) confirmed “modern” water was mainly present in LP and also estimated, using the $^3\text{H}/\text{He}$ method, that 10 % of groundwater in Kleče is very old, but additional analyses are needed for precise determinations.

In the period from March 2010 to October 2010 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ was measured monthly along with alkalinity and pH at LP in the following wells: Hrastje 3, 8 (average -12.6 ‰, $n = 12$), Kleče 8, 11, 12 (average -12.1 ‰, $n = 22$), Jarški prod 1, 3 (average -11.3 ‰, $n = 13$), and the Sava River at Dolsko (average -10.6 ‰, $n = 7$) (Kanduč, unpublished data). At LB sampling was performed only in June 2010 at wells Brest 1a, Brest 2a and Brest 4a with $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values ranging from -11.3 ‰ to -10.8 ‰ (Kanduč, unpublished data). To our best knowledge, this was for the first time $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ was measured at LB.

Vreča et al., (2019c) were the first to perform a stable isotope survey (June and July 2014) of tap water covering Slovenia according to our best knowledge. The authors determined $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ values in nine tap water samples collected in Ljubljana and its vicinity. The $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ values varied between -9.74 and -9.06 ‰, and between -65.2 and -60.1 ‰, respectively. The most negative values were in tap water from wellfield Brest and the most positive from Kleče.

A more detailed investigation within the Ljubljana water supply system started in 2018. The $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values of all objects in the system (wells, joint exits from water pumping station, water reservoirs, water treatment locations, fountains and taps) ranged from -9.53 and -8.68 ‰, -63.6 and -57.8 ‰ and -15.3 and -9.38 ‰, respectively. Also, $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values in samples from Šentvid were less negative, while samples from Brest had on average lower $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values

(Vreča et al., 2019a; 2019b). The results for wells Kleče, Hrastje, Jarški prod and the Sava River are presented in Fig. 3 together with data from Vrzel et al., (2018). The values for 2018 are lower and less spread, which is a result of a shorter sampling period (September to November).

The first 24-hour analysis of tap water was performed from 9:00 on 24/04/19 until 9:00 on 25/04/19, with an emphasis on the hourly variability (Vreča et al., 2019d). The tap water was sampled in the basement of the main building of the JSI where water from two wellfields (Kleče and Brest) is mixed. The diurnal variations of $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ were small. However, 24-hour differences in isotope and major and trace elemental composition suggest that the proportion of groundwater from Kleče and Brest water fields changed over 24 hours.

Based on the past investigations of LP and LB, especially 2018 - 2019, the authors selected a systematic multi-analytical approach that started in 2020. Monthly monitoring of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ and multi-element composition in groundwater in five wellfields (Kleče (4 wells), Brest (4 wells), Hrastje (2 wells), Jarški prod (2 wells), and Šentvid (1 well)) was established. Also, samples from the Sava River (Brod and Šentjakob) are collected on the same day and additional tap water investigations are planned.

The Sava River

Numerous isotope investigations have been performed along the Sava River basin (e.g., Kanduč, 2006; Ogrinc et al., 2008; Brenčič & Vreča, 2016; Torkar et al., 2016; Vrzel et al., 2018; Ogrinc et al., 2018). However, only sampling locations close to Ljubljana (Tacen, Brod, Dolsko, Šentjakob and Črnuče) are relevant for this review (Table 1 and 2). Among these studies, ten reported $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values (Table 2).

Table 3. Values for $\delta^{18}\text{O}$ (‰), $\delta^2\text{H}$ (‰) and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ (‰) for the Sava River at Tacen, Brod, Črnuče, Šentjakob and Dolsko performed in different investigations (locations are downstream).

Location		$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$	Reference
Sava Tacen	Min	-10.1	-67.0	/	Urbanc & Jamnik, 1998; Andjelov et al., 2005; Ogrinc et al., 2008; Urbanc et al., 2012; Cerar & Urbanc, 2013
	Max	-8.51	-57.9	/	
Sava Brod	Min	-10.1	-67.0	-10.7	Kanduč, 2006; Vreča et al., 2019a; 2019b
	Max	-9.2	-60.4	-8.5	
Sava Črnuče		-9.39	-62.4	-9.2	Vreča et al., 2019a; 2019b
Sava Šentjakob	Min	-9.7	-66.4		Vrzel et al., 2018; Vreča et al., 2019a; 2019b
	Max	-8.5	-57.6		
Sava Dolsko	Min	-9.9	-68.0	-12.7	Kanduč, 2006; Ogrinc et al., 2008; 2018
	Max	-8.2	-55.0	-9.9	

Isotope investigations of the Sava River near Ljubljana began in October 1997, when the first sampling in Tacen was performed (Urbanc & Jamnik, 1998). In 2004, Kanduč, (2006) undertook a more systematic monitoring programme of O, H and C isotopes from April 2004, September 2004 and January 2005 at Brod and Dolsko. Ogrinc et al. (2008) also determined $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in the Sava River watershed at Tacen and Dolsko in April, September, and December of 2004 and monthly from January 2005 to August 2006. The authors used data to provide information on hydrological flow paths and to estimate the water residence times. The data (Ogrinc et al., 2008) also forms part of the long-term the Global Network of Isotopes in Rivers database (GNIR; IAEA, 2020), managed by IAEA. The mean residence times at Tacen and Dolsko of 1.54 and 1.09 years, respectively, were estimated by using an exponential model in which precipitation inputs are assumed to mix rapidly with resident water. It was also observed that the Sava River responds quickly to precipitation, which is reflected in the isotope composition of the Sava River water (Ogrinc et al., 2008). Vrzel et al. (2018) report similar $\delta^{18}\text{O}$ values in river water at Šentjakob from March 2010 to December 2011. Monthly isotope sampling data at Dolsko during 2007 to 2010 revealed a mean residence time of 1.20 years, which is higher than previously estimated (1.09 years) in 2004-2006 period (Ogrinc et al., 2018).

Precipitation

Isotope composition of precipitation was monitored at six different locations in Ljubljana, as reported in 13 records (Table 1). Continuous and systematic monitoring of the isotope composition of monthly composite samples has been carried out in Ljubljana by the JSI since 1981 (Pezdič, 1999; 2003; Vreča et al., 2008; 2014; Vreča & Malenšek, 2016). Published data are also included in the Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP) and in the Slovenian Network of Isotopes in Precipitation (SLONIP) from 1981 to 2010. In 1981-2018, the $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ values varied between -19.40 and -1.65 ‰ (mean -8.65 ‰, n=428) and between -147.8 and -7.3 ‰ (mean -59.4 ‰, n=425). The data is an important input into GNIP, which has been evaluated many times (e.g., Rozanski et al., 1993; Ichiyanagi, 2007; Hughes & Crawford, 2012), and in many hydrological and hydrogeological investigations (e.g., Krajcar Bronić et al., 1998; 2020; Pezdič, 1999; 2003; Brenčič & Vreča, 2006; Vreča et al., 2006; Ogrinc et al., 2008; 2018; Vodila et al., 2011; Kanduč et al., 2012; Horvat-

inčić et al., 2011; Zavadlav et al., 2012; Cerar & Urbanc, 2013; Marković et al., 2013; Mezga et al., 2014; Vrzel et al., 2018). The isotope composition of precipitation was also monitored at other locations around Ljubljana in the frame of several short-term investigations. For example, the precipitation was collected in the wellfield Kleče from October 1997 to September 1998 (Urbanc & Jamnik, 1998). The reported $\delta^{18}\text{O}$ ranged from -12.0 to -5.5 ‰. Trček (2005; 2017) monitored $\delta^{18}\text{O}$ values in precipitation from January 2003 to August 2004 and again from 2004 to 2014 at the Union Brewery. $\delta^{18}\text{O}$ values were from -15.2 to -4.1 ‰ (mean -8.9 ‰) during 2003-2004 and -18 to -3 ‰ during the extended observation period (2004 to 2014). Cerar & Urbanc (2013) have also reported the monthly composition of precipitation at the GeoZS in Ljubljana monitored since 2010; however, the exact sampling period is not reported. The average monthly $\delta^{18}\text{O}$ value was -8.51 ‰ (Cerar & Urbanc, 2013).

Conclusions

The use of isotopes to characterize water resources and to track the movement of water in the LP and LB over the past 40 years has significantly improved our understanding of groundwater quality and hydrological processes affecting its recharge and the distribution. Despite this, most isotope data are a result of intermittent short-term studies, and only a few represent long-term monitoring programmes. From all of the analysed articles and reports, it is evident that limited sampling and coverage of monitoring of well networks presents a high risk of, e.g., not detecting contamination events (Jamnik et al., 2012).

The first $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ investigations of groundwater in the LB began in 1976, and only later in 1997 in LP. Also, in 1997 investigations at the Sava River in Tacen started. The first time $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ was systematically measured at LP was in 2003, while at LB it was only in 2010. Historically, isotope studies were performed in the LP; however, since 2011, isotope data are used more frequently, but still sporadically in the LB. These investigations mainly involve sampling from wells – sampling was most often performed in Kleče, while other objects in the water supply system were not well sampled. Five locations on the Sava River near Ljubljana were identified. Also, precipitation was monitored for $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ at six different locations.

To our knowledge, 102 relevant records were found and analysed; however, only 41 records published O, H and C isotope data and underwent

a detailed review. The highest number of publications contained $\delta^{18}\text{O}$ data (40 records), followed by $\delta^2\text{H}$ (32 records), while $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ investigations were rarely implemented (13 records). Also, long-term systemic approach with more frequent (e.g., seasonal) monitoring of relevant environmental isotope tracers is missing. In the scope of this review, we would also like to point out that many investigations contain an insufficient description of sampling times and exact locations (missing coordinates), analytical methods, and reporting of raw data. In this regards, better use of supplementary material, which should include all appropriate metadata would be beneficial and necessary for proper comparison in time and space and would enable tracing isotope changes in water resources.

The first stable water isotope survey of tap water in the City of Ljubljana was performed in 2014. In order to assess the usefulness of environmental isotopes more systematically, monitoring has been performed on the drinking water supply system of Ljubljana since 2018.

Based on all of the results from previous investigations of LP and LB, monthly monitoring of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in groundwater in five water supply facilities was established in January 2020. Besides, also the Sava River is sampled at two locations monthly and additional more detail sampling of tap water is planned. The results will be used to prepare guidelines for future isotope monitoring that will provide a better overall understanding of water interactions of domestic supply important for water managers.

Acknowledgements

This review paper was prepared in the frame of the programme P1-0143, Young research program (PR-09780) and IAEA CRP contract No. 22843 - Use of Isotope Techniques for the Evaluation of Water Sources for Domestic Supply in Urban Areas (F33024). We thank also the reviewers for all valuable comments and D. Heath for linguistic corrections.

References

- Aggarwal, P. K., Gat, J. R. & Froehlich, K. F. 2005: *Isotopes in the water cycle*. Springer, Dordrecht: 381 p.
- Andjelov, M., Rejec Brancelj, I., Smrekar, A., Kladnik, D. & Perko, D. 2005: Podtalnica Ljubljanskega polja. *Geografija Slovenije*, 10. Založba ZRC, Ljubljana: 251 p.
- ARSO, 2012: Agency of Republic of Slovenia for Environment. Archive of hydrological data. Internet: http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/pov_arhiv_tab.php (23. 6. 2020)
- Avak, H. & Brand, W. A. 1995: The Finning MAT HDO-Equilibration - A fully automated H₂O/gas phase equilibration system for hydrogen and oxygen isotope analyses. *Thermo Electronic Corporation, Application News*, 11: 1–13.
- Bowen, G. J., Wassenaar, L. I. & Hobson, K. A. 2005: Global application of stable hydrogen and oxygen isotopes to wildlife forensics. *Oecologia*, 143: 337–348. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1813-y>
- Bowen, G. J., Cai, Z., Fiorella, R. P. & Putman, A. L. 2019: Isotopes in the Water Cycle: Regional- to Global-Scale Patterns and Applications. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 47: 453–479. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-053018-060220>
- Bračič Železnik, B. & Globevnik, L. 2014: Measurement, modelling and analysis of hydrological and hydrogeological processes and trends in a marsh area. In: Daniell, T. (eds.): *Hydrology in a Changing World: Environmental and Human Dimensions*. IAHS Publication 363, Montpellier: 413–418.
- Bračič Železnik, B. 2016: *Dinamika podzemne vode sistemov vodonosnikov Iškega vršaja*. M.Sc. thesis. University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering, Ljubljana: 57 p.
- Bračič Železnik, B., Čenčur Curk, B., Žvab Rožič, P., Torkar, A., Vreča, P. & Brenčič, M. 2017: Deep karstified dolomite aquifer as a source of drinking water – isotopic measurements. In: *EGU General Assembly 2017*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27772.44166>
- Brenčič, M. & Vreča, P. 2005: General Chemistry of bottled waters on the Slovene market = Splošne kemijske karakteristike ustekleničenih vod na slovenskem tržišču. *RMZ*, 52: 549–560.
- Brenčič, M. & Vreča, P. 2006: Identification of sources and production processes of bottled waters by stable hydrogen and oxygen isotope ratios. *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, 20/21: 3205–3212. <https://doi.org/10.1002/rcm.2726>
- Brenčič, M. & Vreča, P. 2007: Isotopic composition of dissolved inorganic carbon in bottled waters on the Slovene market. *Food chem.*, 101/4: 1533–1542. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.04.003>
- Brenčič, M. & Vreča, P. 2010: The use of a finite mixture distribution model in bottled

- water characterisation and authentication with stable hydrogen, oxygen and carbon isotopes – Case study from Slovenia. *J. Geochem. Explor.*, 107/3: 391–399. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2010.08.006>
- Brenčič, M. 2011: Izotopske analize sedimenta in vode iz piezometra P-23 in vodnjaka VD-Brest-3a. Katedra za aplikativno geologijo – Oddelek za geologijo, Ljubljana: 41 p.
- Brenčič, M. & Vreča, P. 2016: Hydrogeological and isotope mapping of the karstic River Savica in NW Slovenia. *Environ. Earth Sci.*, 75:651. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5479-7>
- Breznik, M. 1984: Zmogljivost črpališča Brest v sušni dobi. Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, Ljubljana.
- Brilly, M., Jamnik, B. & Drobne, D. 2003: Chromium contamination of the Ljubljansko Polje aquifer. *RMZ*, 50/1: 71–74.
- Cerar, S. & Urbanc, J. 2013: Carbonate chemistry and isotope characteristics of groundwater of Ljubljansko Polje and Ljubljansko Barje aquifers in Slovenia. *Sci. World J.*, 2013: 948394. <https://doi.org/10.1155/2013/948394>
- Clark, I. & Fritz, P. 1997: Environmental isotopes in hydrogeology. Taylor & Francis: Boca Raton, New York: 328 p.
- Clark, I. 2015: Groundwater Geochemistry and Isotopes, 1st Edition, 456 p.
- Craig, H. 1961: Isotope variations in meteoric waters. *Science*, 133: 1702–1703. <https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>
- Dansgaard, W. 1954: The O^{18} -abundance in fresh water. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 6/5–6: 241–260. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(54\)90003-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(54)90003-4)
- de Groot, P. A. 2004: Handbook of stable isotope analytical techniques. Elsevier, Amsterdam: 1258 p.
- Du, M., Zhang, M., Wang, S., Chen, F., Zhao, P., Zhou, S. & Zhang, Y. 2019: Stable Isotope Ratios in Tap Water of a Riverside City in a Semi-Arid Climate: An Application to Water Source Determination. *Water*, 11: 1441. <https://doi.org/10.3390/w11071441>
- Ehleringer, R. J., Cerling, T., West, B. J., Podlesak, W. D., Chesson, L. & Bowen, G. J. 2008: Spatial considerations of stable isotope analyses in environmental forensics. In: Hester, R. E. & Harrison, R. M. (eds.): Environmental Forensics. The Royal Society of Chemistry, University of York, UK: 36–53.
- Ehleringer, J. R., Barnette, J. E., Jameel, Y., Tipple, B. J. & Bowen, G. J. 2016: Urban water – a new frontier in isotope hydrology. *Isot. Environ. Healt. S.*, 52/4–5: 477–486. <https://doi.org/10.1080/10256016.2016.1171217>
- Epstein, S. & Mayeda, T. 1953: Variation of ^{18}O content of waters from natural sources. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 4/5: 213–224. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(53\)90051-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(53)90051-9)
- Gat, J. R. 1996: Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 24/1: 225–262. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.24.1.225>
- Gehre, M., Hoefling, R., Kowski, P. & Strauch, G. 1996: Sample preparation device for quantitative hydrogen isotope analysis using chromium metal. *Anal. Chem.*, 68/24: 4414–4417. <https://doi.org/10.1021/ac9606766>
- Horita, J., Ueda, A., Mizukami, K. & Takatori, I. 1989: Automatic δD and $\delta^{18}O$ analyses of multi-water samples using H_2^- and CO_2^- water equilibration methods with a common equilibration set-up. *Appl. Radiat. Isot.*, 40/9: 801–805. [https://doi.org/10.1016/0883-2889\(89\)90100-7](https://doi.org/10.1016/0883-2889(89)90100-7)
- Horvatinčič, N., Barešić, J., Krajcar Bronić, I., Obelić, B., Karman, K. & Forisz, I. 2011: Study of the bank filtered groundwater system of the Sava River at Zagreb (Croatia) using isotope analyses. *Central European Geology*, 54/1-2: 121–127. <https://doi.org/10.1556/CEuGeol.54.2011.1-2.12>
- Hughes, C. E. & Crawford, J. 2012: A new precipitation weighted method for determining the meteoric water line for hydrological applications demonstrated using Australian and global GNIP data. *J. Hydrol.*, 464–465: 344–351. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.07.029>
- IAEA, 2020: Global Network of Isotopes in Rivers. The GNIR Internet: <https://nucleus.iaea.org/wiser> (23. 6. 2020)
- Ichiyanagi, K. 2007: Review: Studies and Applications of Stable Isotopes in Precipitation. *J. Jpn. Assoc. Hydrolog. Sci.*, 37: 165–185.
- Jameel, Y., Brewer, S., Good, S. P., Tipple, B. J., Ehleringer, J. R. & Bowen, G. J. 2016: Tap water isotope ratios reflect urban water system structure and dynamics across a semiarid metropolitan area. *Water Resour. Res.*, 52: 5891–5910. <https://doi.org/10.1002/2016WR019104>
- Jamnik, B. & Urbanc, J. 2000: Izvor in kakovost podzemne vode Ljubljanskega polja = Origin and quality of groundwater from Ljubljansko polje. *RMZ*, 47: 167–178.
- Jamnik, B., Kristensen, M., Anderson, U., Sorensen, H. R., Refsgaard, A. & Gustavsson, L. 2000: Water resources management model for Ljubljansko polje and Ljubljansko Barje, Final Report Project No. 98-50228, DHI

- Water & Environment, Denmark, in association with Geological Survey of Slovenia, Hydro – Engineering and Hydro-Consulting, Slovenia.
- Jamnik, B. & Urbanc, J. 2003: Isotope investigations as a tool for water resource management in Ljubljana City (Slovenia) (IAEA-CN--104). International Atomic Energy Agency (IAEA), 189–190.
- Jamnik, B., Bračič Železnik, B. & Urbanc, J. 2003: Diffuse pollution of water protection zones in Ljubljana, Slovenia. In: Proceedings of the 7th International Specialized Conference on Diffuse Pollution and Basin Management, Dublin: 7/1–5.
- Jamnik, B., Auersperger, P., Urbanc, J., Lah, K. & Prestor, J. 2009: Pharmaceuticals as indicators of anthropogenic influence on the groundwater of Ljubljansko polje and Ljubljansko barje aquifers. *Geologija*, 52/2: 241–248. <https://doi.org/10.5474/geologija.2009.024>
- Jamnik, B., Janža, M. & Prestor, J. 2012: Project INCOME: developing a comprehensive approach for Slovenian aquifer management. *Water 21 Magazine of the International Water Association*, 49 p.
- Jamnik, B. & Žitnik, M. 2020: Letno poročilo o skladnosti pitne vode na oskrbovalnih območjih v upravljanju JP VOKA SNAGA v letu 2019. JP VOKA SNAGA, Ljubljana: 27 p.
- Janža, M., Prestor, J., Urbanc, J. & Jamnik, B. 2005: TCE contamination plume spreading in highly productive aquifer of Ljubljansko polje. In: EGU General Assembly, Vienna.
- Janža, M. 2015: A decision support system for emergency response to groundwater resource pollution in an urban area (Ljubljana, Slovenia). *Environ. Earth Sci.*, 73/7: 3763–3774. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3662-2>
- Juren, A., Pregl, M. & Veselič, M. 2003: Project of an urban lysimeter at the Union brewery, Ljubljana, Slovenia. *RMZ*, 50/3: 153–156.
- Kanduč, T. 2006: Hidrogeokemične značilnosti in kroženje ogljika v porečju reke Save v Sloveniji. Ph.D. Thesis. University of Ljubljana, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Department of Geology, Ljubljana: 141 p.
- Kanduč, T., Mori, N., Kocman, D., Stibilj, V. & Grassa, F. 2012: Hydrogeochemistry of Alpine springs from North Slovenia: Insights from stable isotopes. *Chem. Geol.*, 300/301: 40–54. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.01.012>
- Karahodžič, M. 2005: Dinamika izotopov dušika v nitratih v naravnem zaledju Ljubljanskega polja. Master thesis. University of Ljubljana, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Department of Geology, Ljubljana: 92 p.
- Kendall, C. & Doctor, D. 2003: Stable Isotope Applications in Hydrologic Studies. *Treatise on Geochemistry*, 5: 319–364. <https://doi.org/10.1016/b0-08-043751-6/05081-7>
- Krajcar Bronić I., Horvatinčić, N. & Obelić, B. 1998: Two decades of environmental isotope records in Croatia: Reconstruction of the past and prediction of the future levels. *Radiocarbon*, 40: 399–416.
- Krajcar Bronić, I., Barešić, J., Borković, D., Sironić, A., Lovrenčić Mikelić, I. & Vreča, P. 2020: Long-Term Isotope Records of Precipitation in Zagreb, Croatia. *Water*, 12/226: 1–28. <https://doi.org/10.3390/w12010226>
- Marković, T., Brkić, Ž. & Larva, O. 2013: Using hydrochemical data and modelling to enhance the knowledge of groundwater flow and quality in an alluvial aquifer of Zagreb, Croatia. *Sci. Total Environ.*, 458–460: 508–516. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.04.013>
- Meier-Augenstein, W. & Schimmelmann, A. 2019: A guide for proper utilisation of stable isotope reference materials. *Isot. Environ. Health. S.*, 55/2: 113–128. <https://doi.org/10.1080/10256016.2018.1538137>
- Mencej, Z. 1988/1989: Prodni zasipi pod jezerskimi sedimenti Ljubljanskega barja. *Geologija*, 31/32: 517–553.
- Mezga, K. 2014: Natural hydrochemical background and dynamics of groundwater in Slovenia. Doctoral dissertation. University of Nova Gorica, Nova Gorica: 226 p.
- Mezga, K., Urbanc, J. & Cerar, S. 2014: The isotope altitude effect reflected in groundwater: a case study from Slovenia. *Isot. Environ. Health. Stud.*, 50/1: 33–51. <https://doi.org/10.1080/10256016.2013.826213>
- Mook, W. G. 2001: Environmental isotopes in the hydrological cycle: principles and applications, Volumes I. Technical documents in Hydrology No. 39. IAEA-UNESCO: Paris, France.
- Morrison, J., Brockwell, T., Merren, T., Fourel, F. & Phillips A. M. 2001: On-line high-precision stable hydrogen isotopic analyses on nanoliter water samples. *Anal. Chem.*, 73/15: 3570–3575. <https://doi.org/10.1021/ac001447t>
- Official Gazette RS, Nos. 19/04, 35/04, 26/06, 92/06, 25/09, 74/15 and 51/17. Rules on drinking water. Internet: <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=PRAV3713> (25.9.2020)

- Ogrinc, N., Kanduč, T., Stichler, W. & Vreča, P. 2008: Spatial and seasonal variations in $\delta^{18}\text{O}$ and δD values in the Sava River in Slovenia. *J. Hydrol.*, 359/3–4: 303–312. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.010>
- Ogrinc, N., Kocman, D., Milijević, N., Vreča, P., Vrzec, J. & Povinec, P. 2018: Distribution of H and O stable isotopes in the surface waters of the Sava River, the major tributary of the Danube River. *J. Hydrol.*, 565: 365–373. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.024>
- Pezdič, J. 1998: Stable isotopes as natural tracers of the karst recharge to the tertiary clastic aquifers: a case study of the southern part of Ljubljana marsh (Ljubljansko barje, Slovenia) = Stabilni izotopi kot naravna sledila pri napajanju terciarnega klastičnega vodonosnika iz krasa: študija južnega dela Ljubljanskega barja, Slovenija. *Acta carologica*, 27/1: 349–360
- Pezdič, J. 1999: Izotopi in geokemijski procesi. Naravoslovnohitiška fakulteta, Oddelek za geologijo, Ljubljana: 269 p.
- Pezdič, J. 2003: Isotope fractionation of long term precipitation averages in Ljubljana (Slovenia). *RMZ*, 50: 641–650.
- Prestor, J., Pestotnik, S., Meglič, P. & Janža, M. 2011: Model of environmental pressures and impacts. A.3.3 final report of INCOME project (LIFE+ programme). Geological Survey of Slovenia: Ljubljana.
- Prestor, J., Jamnik, B., Pestotnik, S., Meglič, P., Cerar, S., Janža, M., Auersperger, P. & Bračič-Železnik, B. 2017: Upravljanje onesnaženj podzemne vode na ravni funkcionalnega mestnega območja. In: 23. Simpozij z mednarodno udeležbo, Vodni dnevi 2017, Portorož, 5.–6.10.
- Rozanski, K., Araguas-Araguas, L. & Gonfiantini, R. 1993: Isotopic patterns in modern global precipitation. *Geophys. Monogr.*, 78: 1–36. <https://doi.org/10.1029/GM078p0001>
- SLONIP. Slovenian Network of Isotopes in Precipitation. The SLONIP Database. Internet: <https://slonip.ijs.si/> (01. 07. 2020)
- Tipple, B. J., Jameel, Y., Chau, T. H., Mancuso, C. J., Bowen, G. J., Dufour, A., Chesson, L. A. & Ehleringer, J. R. 2017: Stable hydrogen and oxygen isotopes of tap water reveal structure of the San Francisco Bay Areas water system and adjustments during a major drought. *Water Res.*, 119: 212–224. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.04.022>
- Torkar, A., Brenčič, M. & Vreča, P. 2016: Chemical and isotopic characteristics of groundwater-dominated Radovna River (NW Slovenia). *Environ. Earth Sci.*, 75/18: 1–18. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6104-5>
- Trček, B. 2005: Investigations of flow system and solute transport at an urban lysimeter at Union Brewery, Ljubljana, Slovenia = Proučevanje tokovnega sistema in prenosa snovi v urbanem lizimetru Pivovarne Union, Ljubljana, Slovenija. *RMZ*, 52/4: 685–696.
- Trček, B. 2006: Izotopske raziskave na območju vodnega telesa Pivovarne Union = Isotopic investigations in the area of the Union Brewery water body. *Geologija*, 49/1: 103–112. <https://doi.org/10.5474/geologija.2006.008>
- Trček, B. 2017: Application of environmental tracers to study the drainage system of the unsaturated zone of the Ljubljansko polje aquifer = Uporaba naravnih sledil za študij drenažnega sistema nezasičene cone vodonosnika Ljubljanskega polja. *Geologija*, 60/2: 267–277. <https://doi.org/10.5474/geologija.2017.019>
- Uhan, J. & Kranjc, M. 2003: Podzemne vode. In: Uhan, J. & Bat, M. (eds.): Vodno bogastvo Slovenije. Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana: 55–67.
- Urbanc, J. & Jamnik, B. 1998: Izotopske raziskave podzemne vode Ljubljanskega polja = Isotope investigations of groundwater from Ljubljansko polje (Slovenia). *Geologija*, 41: 355–364. <https://doi.org/10.5474/geologija.1998.018>
- Urbanc, J. & Jamnik, B. 2002: Izotopske raziskave vodnih virov Ljubljanskega barja = Isotopic investigations of the Ljubljansko barje water resources. *Geologija*, 45/2: 589–594. <https://doi.org/10.5474/geologija.2002.070>
- Urbanc, J., Jamnik, B., Cerar, S. & Mali, N. 2012: Hydrogeological investigations for improvement of conceptual model. Final report. Geological Survey of Slovenia, Project: INCOME (LIFE07ENV/SLO/000725), Ljubljana: 48 p.
- Vižintin, G., Souvent, P., Veselič, M. & Čenčur Curk, B. 2009: Determination of urban groundwater pollution in alluvial aquifer using linked process models considering urban water cycle. *J. Hydrol.*, 377/3–4: 261–273. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.025>
- Vodila, G., Palcsu, L., Futó, I. & Szántó, Zs. 2011: A 9-year record of stable isotope ratios of precipitation in Eastern Hungary: Implications on isotope hydrology and regional palaeoclimatology. *J. Hydrol.* 400: 144–153. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.01.030>

- Vreča, P., Kanduč, T., Žigon, S. & Trkov, Z. 2005: Isotopic composition of precipitation in Slovenia. In: Gourey, L., (eds.): Isotopic composition of precipitation in the Mediterranean basin in relation to air circulation patterns and climate; IAEA-TECDOC-1453, Vienna: 157–172.
- Vreča, P., Krajcar Bronić, I., Horvatinčić, N. & Barešić, J. 2006: Isotopic characteristics of precipitation in Slovenia and Croatia: Comparison of continental and maritime stations. *J. Hydrol.*, 330/3–4: 457–469. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.04.005>
- Vreča, P., Krajcar Bronić, I., Leis, A. & Brenčič, M. 2008: Isotopic composition of precipitation in Ljubljana (Slovenia). *Geologija*, 51/2: 169–180. <https://doi.org/10.5474/geologija.2008.018>
- Vreča, P., Žigon, S., Zavadlav, S. & Šturm, M. 2011: Analizno poročilo št. GEO 009/2011, Institut "Jožef Stefan", Odsek za znanosti o okolju, Ljubljana: 6 p.
- Vreča, P., Stibilj, V., Žigon, S. & Svetek, B. 2013: Analizno poročilo št. GEO 007/2013, Institut "Jožef Stefan", Odsek za znanosti o okolju, Ljubljana: 5 p.
- Vreča, P., Krajcar Bronić, I., Leis, A. & Demšar, M. 2014: Isotopic composition of precipitation at the station Ljubljana (Reaktor), Slovenia – period 2007–2010. *Geologija*, 57/2: 217–230. <https://doi.org/10.5474/geologija.2014.019>
- Vreča, P., Štok, M., Žigon, S. & Svetek, B. 2015: Analizno poročilo št. GEO 005/2015, Institut "Jožef Stefan", Odsek za znanosti o okolju, Ljubljana: 4 p.
- Vreča, P. & Malenšek, N. 2016: Slovenian Network of Isotopes in Precipitation (SLONIP) – a review of activities in the period 1981–2015. *Geologija*, 59/1: 67–84. <https://doi.org/10.5474/geologija.2016.004>
- Vreča, P., Štok, M., Žigon, S. & Svetek, B. 2017: Isotope composition of precipitation at stations Ljubljana-Portorož airport: period 2011–2015, IJS working report 12383, Jožef Stefan Institute, Department of Environmental Sciences, Ljubljana: 32 p.
- Vreča, P., Nagode, K., Kanduč, T., Lojen, S., Šlejkovec, Z., Žigon, S., Močnik, N., Novak, R., Bračič-Železnik, B., Jamnik, B. & Žitnik, M. 2019a: First working report on multi-isotope characterization of water resources for domestic supply in Ljubljana, Slovenia, IJS working report 12759, Jožef Stefan Institute, Department of Environmental Sciences, Ljubljana: 26 p.
- Vreča, P., Kanduč, T., Šlejkovec, Z., Žigon, S., Nagode, K., Močnik, N., Bračič-Železnik, B., Jamnik, B. & Žitnik, M. 2019b: Karakterizacija vodnih virov za javno oskrbo s pitno vodo v Ljubljani s pomočjo različnih geokemičnih analiz. In: Kuhar, M. (eds.): Raziskave s področja geodezije in geofizike 2018: zbornik del, 24. srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana: 111–119.
- Vreča, P., Nagode, K., Žigon, S. & Vaupotič, J. 2019c: Working report on hydrogen and oxygen isotope composition of tap water in Slovenia, IJS working report 12950, Jožef Stefan Institute, Department of Environmental Sciences, Ljubljana: 40 p.
- Vreča, P., Nagode, K., Kanduč, T., Zuliani, T. & Žigon, S. 2019d: Third Working report on Multi-isotope characterization of water resources for domestic supply in Ljubljana, Slovenia - 24 hours experiment of the tap water, IJS working report, 12905, Jožef Stefan Institute, Department of Environmental Sciences, Ljubljana: 38 p.
- Vreča, P., Kanduč, T., Žigon, S., Nagode, K., Zuliani, T., Štok, M. & Svetek, B. 2019e: Poročilo o določitvi izotopske sestave vode, črpalni poskus Brest, IJS delovno poročilo 12857, Institut "Jožef Stefan", Odsek za znanosti o okolju, Ljubljana: 3 p.
- Vreča, P., Kanduč, T., Žigon, S., Nagode, K., Zuliani, T., Štok, M. & Svetek, B. 2019f: Poročilo o določitvi izotopske sestave vode, črpalni poskus Brest (piezometra PB-24a/19 in PB-24c/19), IJS delovno poročilo 12985, Institut "Jožef Stefan", Odsek za znanosti o okolju, Ljubljana: 4 p.
- Vrzel, J., Solomon, D. K., Blažeka, Ž. & Ogrinc, N. 2018: The study of the interactions between groundwater and Sava River water in the Ljubljansko polje aquifer system (Slovenia). *J. Hydrol.*, 556: 384–396. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.022>
- Wassenaar, L. I., Coplen, T. B. & Aggarwal, P. K. 2014: Approaches for Achieving Long-Term Accuracy and Precision of 18O and 2H for Waters Analyzed using Laser Absorption Spectrometers. *Environ. Sci. Technol.*, 48: 1123–1131. <https://doi.org/10.1021/es403354n>
- Wassenaar, L. I., Terzer-Wassmuth, S., Douence, C., Araguas-Araguas, L., Aggarwal, P. & Coplen, T. 2018: Seeking excellence: An evaluation of 235 international laboratories conducting water isotope analyses by isotope-ratio and laser-absorption spectrometry. *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, 32/5: 393–406. <https://doi.org/10.1002/rcm.8052>

- Zavadlav, S., Mazej, D., Zavašnik, J., Rečnik, A., Dominguez-Villar, D., Cukrov, N. & Lojen, S. 2012: C and O stable isotopic signatures of fast growing dripstones on alkaline substrates: reflection of growth mechanism, carbonate sources and environmental conditions. *Isot. Environ. Health S.*, 48/2: 354–371. <https://doi.org/10.1080/10256016.2012.645540>
- Zhao, S., Hu, H., Tian, F., Tie, Q., Wang, L., Liu, Y. & Shi, C. 2017: Divergence of stable isotopes in tap water across China. *Sci. Rep.*, 7: 43653. <https://doi.org/10.1038/srep43653>
- Žlebnik, L. 1971: Pleistocene Deposits of the Kranj, Sora and Ljubljana Fields. *Geologija*, 14: 5–51.



Izgradnja lizimetrov za preučevanje izpiranja potencialno nevarnih snovi iz gradbenih proizvodov

Construction of lysimeters for researching the leaching of potentially toxic elements from building materials

Janez TURK¹, Janko URBANC², Ana MLADENOVIC¹, Alenka PAVLIN³, Primož OPRČKAL¹, Karmen FIFER BIZJAK¹, Barbara LIKAR¹, Marko BRODNIK¹ & Nina MALI²

¹Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva ulica 12, 1000 Ljubljana, Slovenija; e-mail: janez.turk@zag.si

²Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, 1000 Ljubljana, Slovenija

³TERMIT d.d., Drtija 51, 1251 Moravče, Slovenija

Prejeto / Received 1. 6. 2020; Sprejeto / Accepted 28. 10. 2020; Objavljeno na spletu / Published online 7. 12. 2020

Ključne besede: lizimeter, izlužek, okoljski monitoring, geotehnični zasip, odpadki

Key words: lysimeter, leachate, environmental monitoring, geotechnical fill, waste

Izvleček

Z uporabo recikliranih odpadkov v gradbeništvu nadomeščamo naravne materiale in s tem vzpostavljamo krožno gospodarstvo na lokalnem nivoju. Pomemben vidik je tudi ohranjanje naravnih virov. To je še posebno pereče pri zemeljskih delih (npr. zasipih in nasipih), kjer prihaja do velike porabe materialov. Geotehnični kompoziti iz recikliranih materialov, v primerjavi z naravnimi agregati ali zemljinami, lahko vsebujejo višje celotne koncentracije potencialno nevarnih snovi (težke kovine, klorid, sulfat, fluorid, organska onesnaževala itd.). Pogoj za uporabo takšnih kompozitov je, da so v njih potencialno nevarne snovi imobilizirane in da so zato iz kemijskega vidika trajno inertni. Možni vplivi na okolje, predvsem prenos različnih potencialno nevarnih snovi iz kompozitov v tla oziroma vodonosnik, so običajno ovrednoteni na laboratorijski ravni, medtem ko je njihovo obnašanje v dejanskem okolju slabo proučeno. Zato se pojavljajo zahteve po razvoju občutljivih, zanesljivih in cenovno ter časovno učinkovitih orodij za določitev masnih tokov potencialno nevarnih snovi iz gradbenih proizvodov, na primer geotehničnih kompozitov, pod vplivi različnih okoljskih dejavnikov. V članku predstavljamo postopek vzpostavitve terenskega laboratorija na osnovi sistema "pan" lizimetrov, za zbiranje izcednih voda iz zasipov, ki so bili izdelani iz geotehničnih kompozitov iz recikliranih materialov. Lizimetre smo konstruirali in izvedli tako, da je njihova izgradnja cenovno ugodna, hkrati pa so po svojih dimenzijah dovolj veliki, da reprezentativno odražajo procese v zgrajenih geotehničnih zasipih. Pridobljeni podatki o količini in parametrih izcedne vode bodo služili kot osnova za določanje vodne bilance in za študij imobilizacije potencialno nevarnih snovi v kompozitih. Hkrati bodo uporabljeni kot vhodni podatki za geokemijski numerični model, s katerim bomo simulirali transport potencialno nevarnih snovi, sproščenih iz preučevanih kompozitov, v različnih tipih vodonosnikov (npr. medzrnski in razpoklinski).

Abstract

By using recycled waste in construction, natural materials are being replaced, thus establishing a circular economy at the local level. An important aspect is also the conservation of natural resources. This is especially important in case of earthworks (embankments, backfills), which are large consumers of materials. Compared to natural aggregates and earth, geotechnical composites based on recycled materials can contain a higher total content of potentially toxic elements (heavy metals, chloride, sulphate, fluoride, organic pollutants etc.). The prerequisite for beneficial use of such composites is that the potentially toxic elements are immobilized in the composites, meaning that they are chemically inert. Potential environmental impacts, especially those associated with transfer of potentially toxic elements from new geotechnical composites into soil (aquifer respectively), are usually evaluated on laboratory scale, while their behaviour in real environment is usually poorly investigated. For this reason, there is a demand for the development of sensitive, reliable, and cost and time efficient monitoring tools for determining mass flows of potentially toxic elements from building materials, for example geotechnical composites, which are under the influence of various environmental factors. This paper presents the construction of field laboratory, based on a system of pan lysimeters. The lysimeters are used to collect leachate from geotechnical composites based on recycled materials. They are constructed in a way to be relatively low cost and at the same time large enough to representatively reflect the processes in geotechnical fills. Obtained data on the amount and quality of leachate can be used as a basis for the study of immobilization processes and for water balance. Moreover, this data will be used as input in the geochemical numerical model for the simulation of transport of potentially toxic elements released from geotechnical fills in different types of aquifers (alluvial aquifer with intergranular porosity, aquifer in consolidated rocks with fissure porosity).

Uvod

Pri različnih industrijskih procesih nastajajo velike količine stranskih proizvodov ali odpadkov, ki jih je možno z recikliranjem uporabiti kot sekundarne surovine v gradbeništvu. Zlasti tisti, ki nastajajo v velikih količinah, se v geotehniko oz. tudi širše v gradbeništvu uporabljajo kot reciklirani materiali, ki lahko nadomeščajo naravne surovine, predvsem naravne agregate in zemljine. Prednosti uporabe stranskih proizvodov in odpadkov so predvsem ohranjanje naravnih surovin in običajno manjši okoljski odtis. Pogoja za uporabo stranskih proizvodov in odpadkov sta njihova tehnična ustreznost in okoljska sprejemljivost, kar je možno doseči z ustrezno predelavo, imobilizacijo potencialnih onesnaževal in pravilno vgradnjo (Turk et al., 2015; Mladenovič & Mauko Pranjić, 2016; Mladenovič 2018; Fifer Bizjak et al., 2019). V primerjavi z materiali naravnega izvora, reciklirani materiali običajno vsebujejo višje celotne koncentracije potencialno nevarnih snovi (npr. težke kovine, klorid, sulfat, fluorid, organska onesnaževala itd.). To dejstvo vpliva na okoljske omejitve glede njihove uporabe. Ob stiku recikliranega materiala z vodo (padavine, podzemna voda, porna voda) lahko pride do sproščanja onesnaževal v okolje, predvsem v tla oziroma vodonosnik (Birgisdóttir et al., 2006; Turk et al., 2014). Po načelih analize tveganja, tak material predstavlja možen vir za sproščanje onesnaževal v okolje. Transportni medij za onesnaženje je voda. Če pride v vodonosnik, predstavlja pot prenosa do sprejemnikov (ljudi in živali), ki jo zaužijejo. Masni tok potencialno nevarnih snovi iz materiala je v tesni povezavi z vodno bilanco oziroma s količino vode, ki v določenem časovnem obdobju prehaja skozi material. Slednje lahko preučimo z uporabo lizimetrov (Mali, 2002; Luthy et al., 2003; von Unold & Fank, 2008).

Z ustreznim postopkom proizvodnje in vgradnje geotehničnih kompozitov iz recikliranih materialov je mogoče doseči imobilizacijo potencialno nevarnih snovi in pridobiti kemično inertne gradbene proizvode (Oprčkal et al., 2020), ki se lahko uporabljajo kot material za zasipe in nasipe (Smolar et al., 2016). Pri razvoju in uporabi teh novih materialov se glavna skrb nanaša na nezadostno poznavanje možnih okoljskih vplivov v teku njihove življenjske dobe (Schwab et al., 2014). Podzemna voda je najbolj ranljivo vodno okolje in eden od najpomembnejših virov pitne vode. Da bi preprečili onesnaženje podzemne vode, se v novejšem času pojavlja zahteva po razvoju občutljivih, zanesljivih in cenovno ter

časovno učinkovitih orodij za spremljanje potencialnih onesnaževal v izcedni in podzemni vodi. Z eksperimentalnim delom, ki temelji na uporabi lizimetrov, lahko določimo vodno bilanco in masni tok potencialno nevarnih snovi v izlužku geotehničnih kompozitov (von Unold & Fank, 2008). Na podlagi rezultatov lizimeterskih poskusov lahko vzpostavimo učinkovit monitoring za določitev možnih dolgoročnih vplivov geotehničnih kompozitov na podzemno vodo in z njim obenem spremljamo učinkovitost imobilizacije onesnaževal.

V tem prispevku predstavljamo postopek vzpostavitve terenskega laboratorija – sistema lizimetrov za zbiranje izcednih voda iz geotehničnih zasipov. Osnovo terenskega laboratorija predstavljajo lizimetri s pripadajočo merilno opremo in zbiralniki izcedne vode. Lizimetre smo konstruirali tako, da je njihova izgradnja cenovno ugodna, hkrati pa so dovolj veliki, da reprezentativno odlikavajo hidrodinamične, hidravlične in izluževalne procese v proučevanih geotehničnih zasipih. Končni cilj raziskave je proučiti dolgoročno učinkovitost imobilizacije potencialno nevarnih snovi v izbranih kompozitih, koncentracijo sproščenih snovi ter njihovo usodo oziroma transport v različnih tipih naravne zemljine (različni vodonosniki). Usodo potencialno nevarnih snovi sproščenih iz kompozitov v naravnem okolju je težko določiti, posledično procesi sorbcije in desorbcije teh snovi v geološki podlagi niso v celoti pojasnjeni. Zato raziskava predstavlja izziv iz znanstvenega in tehničnega vidika.

Pomen lizimetrov

V stroki obstajajo različne metode in pripomočki za preučevanje masnega toka potencialno nevarnih snovi iz zemljin ali geotehničnih zasipov v naravnem okolju. Številne raziskave dinamike prenikajoče vode in z njo povezanega transporta organskih in/ali anorganskih onesnaževal temeljijo na uporabi lizimetrov (Mali et al., 2007; Koroša et al., 2020). Ti omogočajo zbiranje izcedne vode za potrebe ugotavljanja vodne bilance v preučevani zemljini/zasipu in določanja kemijskih parametrov vode (prisotnost in vsebnost onesnaževal) (Hansen et al., 2000; Howell, 2005; von Unold & Fank, 2008; Albright et al., 2012). Raziskave z uporabo lizimetrov predstavljajo vez med laboratorijskimi in terenskimi raziskavami (Singh et al., 2017). Lizimetri lahko zajamejo neprimerno večji volumen materiala, kot preiskava v laboratoriju. Zaradi izpostavljenosti vremenskim pogojem odsevajo dejanske pogoje,

ki vladajo v okolju. Predvsem slednje je njihova glavna prednost v primerjavi z laboratorijskimi izluževalnimi testi (Hansen et al., 2000; Abdou in Flury, 2004).

Lizimetri se uporabljajo na različnih področjih, njihova uporaba je najbolj razširjena v kmetijstvu in raziskavah okolja nasploh (Corwin & Le Mert, 1994; Saporito et al., 2016). Podatki o parametrih izcedne vode, vzorčene v terenskih lizimetrih, lahko predstavljajo osnovo za načrtovanje odlagališč odpadkov (Albright et al., 2013), za uporabo pesticidov in gnojil v kmetijstvu (Corwin & Le Mert, 1994), za uporabo recikliranih materialov v zemeljskih delih itd.

Izgradnja lizimetrov za preučevanje izcednih voda iz geotehničnih kompozitov

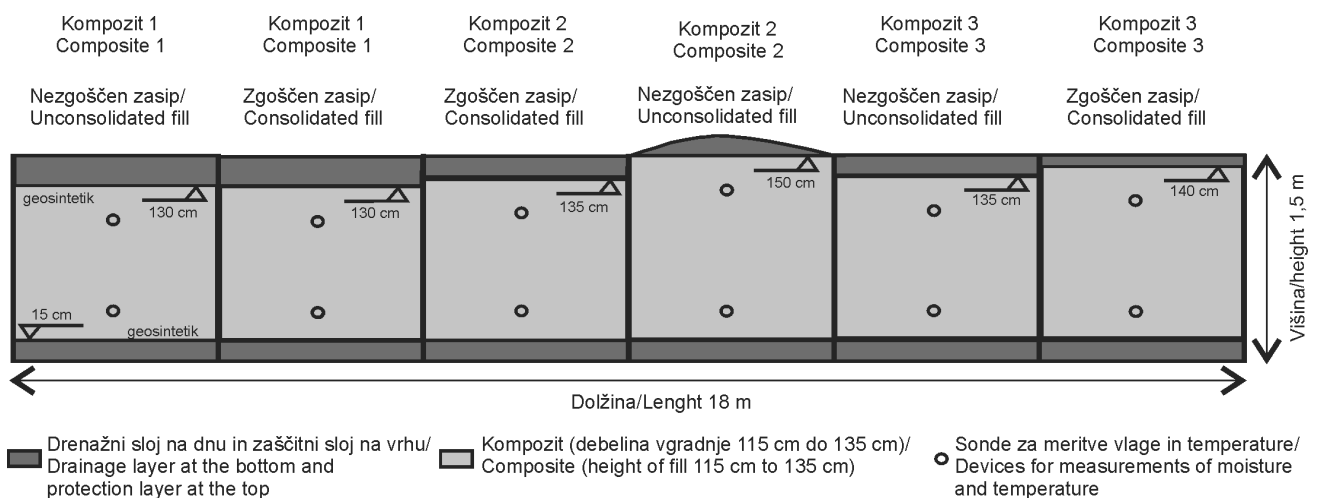
Na testnem polju podjetja TERMIT smo postavili šest lizimetrov, v katere smo vgradili izbrane geotehnične kompozite. Ti kompoziti se uporabljajo za izgradnjo nekonstrukcijskih sanacijskih nasipov ali zasipov. Podjetje TERMIT želi sanirati 1.500.000 m³ veliko degradirano opuščeno rudarsko območje. Sanacija poteka z vgrajevanjem geotehničnih kompozitov iz recikliranih odpadkov (Cerar & Bavec, 2019). Lizimetri so v obliki posod z dimenzijami: dolžina 3 m, širina 3 m in višina 1,5 m. Njihovo ogrodje predstavlja kovinska konstrukcija iz debelostenskih cevi (60 × 60 × 4 mm), na katero smo z vijaki pritrtili opažne plošče debeline 27 mm (sl. 1 in 2). Notranje stranice lesenega opaža smo pred zapolnitvijo lizimetra z geotehničnim kompozitom obložili s čepasto folijo, ki služi kot hidroizolacija.

Na dnu vsakega lizimetra smo vgradili izolacijski sloj iz glin ter oblikovali odtočni kanal za zbiranje izcedne vode. Glineni sloj smo v celoti prekrili s plastično folijo debeline 0,5 cm. Folijo smo na vseh štirih straneh lizimetra zavahali navzgor za 0,5 m in jo pritrtili na stene lizimetra, s čimer smo preprečili, da bi izcedna voda nenaadzorovano iztekala ob straneh lizimetra (sl. 3).

V odtočni kanal smo eno ob drugi položili dve perforirani cevi iz alkatena (PE 100, fi 3 cm) (sl. 3). Cevi smo speljali skozi lizimeter do nekaj metrov oddaljenega zbiralnika izcedne vode (sl. 2). V ta namen smo tik nad dnom lizimetra prevrtali opažno ploščo, prav tako tudi plastično folijo. Premer vrtalne krone, s katero smo prevrtali folijo, je bil manjši od premera cevi iz alkatena, vendar dovolj velik, da smo cev lahko napeljali skozi. To je pomembno z vidika zagotavljanja vodo-neprepustnosti stika, ki smo ga dodatno zatesnili s silikonskim lepilom. Ena cev je rezervna, če bi med vgradnjo kompozita ali kasneje prišlo do zamašitve cevi, bo na voljo še vedno druga cev za dreniranje izcedne vode.

Na pripravljeno dno lizimetrov smo nasuli približno 15 cm debel sloj kremenčevega peska (frakcije 4/8 mm), ki predstavlja drenažni sloj in čezenj položili geosintetični filter (netkani geotekstil, ki se uporablja kot ločilni oziroma zaščitni sloj).

Drenažni sloj je dovolj debel, da v celoti prekrija odtočni kanal, obe drenažni cevi in celotno površino dna posameznega lizimetra. S tem je preprečeno zasičenje z vodo ob spodnji površini kompozita zaradi morebitnega dviga nivoja izcedne vode v drenažni plasti ob intenzivnejšem



Sl. 1. Vzdolžni profil šestih lizimetrov z nakazanimi debelinami drenažnega sloja, vgrajenih geotehničnih kompozitov in zaščitnega sloja. Sloji so ločeni z geosintetikom. Nakazane so tudi lokacije sond.

Fig. 1. Longitudinal profile of six lysimeters with indicated thicknesses of the drainage layer, embedded geotechnical composites and protective layer. The layers are separated by geosynthetics. Probe locations are also indicated.



Sl. 2. Kovinsko ogrodje šestih lizimetrov, postavljeno na utrjen nasip (zgoraj), montiranje opažnih plošč na ogrodje (spodaj levo) in dokončani lizimetri z drenažnimi cevmi speljanimi do zbiralnikov ob vnožju nasipa (spodaj desno).

Fig. 2. Metal framework of six lysimeters, placed on an embankment (upper photos), fitting of formwork panels on the metal framework (bottom left) and completed lysimeters with drainage pipes leading to the reservoirs at the foot of the embankment (bottom right).

toku vode skozi zasip. S tega vidika je pomembna tudi prevodnost drenažne cevi, ki mora sproti odvajati izcedno vodo iz filtrne plasti na dnu lizimetra v zbiralnik izcedne vode. Lizimetre smo postavili na utrjen nasip z namenom, da se lahko izcedna voda preko drenažnih cevi v zbiralnike ob vnožju nasipa pretaka gravitacijsko (sl. 2).

Sledila je vgradnja izbranih geotehničnih kompozitov. Sestava, tehnološki postopek izdelave in pogoji vgradnje kompozitov so bili za izbrani namen uporabe predhodno optimizirani na laboratorijskem nivoju. Kompoziti so v različnih masnih deležih vsebovali reciklirane materiale iz inertnih in nenevarnih odpadkov: papirniški pepel, papirniški mulj, livarsko žlindro in pesek, ogorke in žlindro iz sežiga nenevarnih odpadkov ter digestat iz anaerobne biološke obdelave nenevarnih komunalnih odpadkov. Recikliranim materialom je bil v postopku predelave primešan mulj. Le ta predstavlja glineno-meljni ostanek (Likar et al., 2020), ki nastaja pri pranju

kremenčevega peska v podjetju TERMIT. Recepture so bile optimizirane z namenom doseganja okoljske sprejemljivosti kompozitov oziroma njihove inertnosti. Pucolanske in hidravlične faze, ki jih vsebujejo pepeli, po reakciji z vodo tvorijo nove mineralne faze. Le te in minerali glin, ki sestavljajo separacijski mulj, omogočajo kemijsko in fizikalno imobilizacijo potencialno nevarnih snovi v vezanem kompozitu. Za doseganje imobilizacije in vezave v geotehničnih kompozitih je pri pripravi potrebno upoštevati tudi optimalno vsebnost vlage, ki je predhodno določena s standardnim Proctorjevim postopkom (SIST EN 13286-2:2010/AC:2013). Kompozit z optimalno vsebnostjo vlage je možno vgraditi na način, da dosega maksimalno zgoščenost, ki zagotavlja njegovo mehansko stabilnost in slabo vodoprepustnost. To pa sta pogoja za učinkovito fizikalno imobilizacijo potencialno nevarnih snovi (Oblak et al., 2011; Mladenovič et al., 2017; Oprčkal et al., 2020).



Sl. 3. Priprava vodo neprepustne podlage, oblikovanje odtočnega kanala in montaža drenažnih cevi.
Fig. 3. Preparation of a waterproof base layer, design of a drainage channel and installation of drainage pipes.

Posamezni odpadki so bili pred predelavo skladiščeni na začasnih, ločenih deponijah, kjer so bili v prvi fazi predelave homogenizirani z mešalno žlico. Pred vgradnjo smo iz deponij odvzeli vzorce odpadkov in jim v laboratoriju določili vsebnost vlage in suhe snovi. Količina posameznih komponent v kompozitu je namreč določena na podlagi suhih masnih deležev (Smolar et al., 2016). Pripravili smo mešalni plato, kamor smo z bagrsko tehtalno žlico v ustreznih deležih zaporedno dodajali posamezne komponente. Vse skupaj smo večkrat premešali z mešalno žlico (sl. 4). V fazi homogenizacije kompozita se je po potrebi dodajala voda, z namenom doseči optimalno vsebnost vlage v kompozitu, ki je bila predhodno določena v laboratoriju s standardnim Proctorjevim postopkom (SIST EN 13286-2:2010/AC:2013). Vsebnost vlage v kompozitu se je na terenu preverjala z uporabo izotopske sonde. Homogen in optimalno navlažen kompozit smo nato kot zasip po plasteh vgradili v testno polje (sl. 4) (Likar et al., 2020).

Pripravili smo tri, po sestavi različne geotehnične kompozite, vsakega smo vzporedno vgradili v dva lizimetra na dva načina. Prvi način vgradnje je potekal po slojih oziroma plasteh in predstavlja optimalno oziroma pravilno vgrajevanje kompozita v zasip. Vsak posamezen sloj debeline 30 cm smo zgostili in utrdili z vibracijsko ploščo in nabijalcem (sl. 4), sledilo je nasutje novega sloja in ponovno zgoščevanje ter utrjevanje. Tak način vgradnje kompozita ustreza zahtevi po vsaj 95 % zgoščenosti kompozita, glede na največjo suho gostoto, predhodno določeno v laboratoriju s standardnim Proctorjevim postopkom (SIST EN 13286-2:2010/AC:2013). Drug način vgradnje je predstavljal skrajni primer neupoštevanja osnovnih geotehničnih pristopov za gradnjo zasipa. V tem primeru smo kompozit nasuli v slojih, debelih približno 30 cm in vsak sloj posebej steptali. Takšen neprimeren način vgradnje se odraža v večji poroznosti vgrajenega kompozita, zaradi česar pričakujemo večjo infiltracijo padavinske vode in posledično večji tok

skozi kompozit v zasipu. To ima neposreden vpliv na stopnjo zasičenosti kompozita z vodo (razmerje voda / suha snov) in na izluževanje potencialno nevarnih snovi. Po zgoščanju vsake vgrajene plasti (prvi način vgradnje) smo izvedli kontrolo vgradnje z izotopsko sondo za določitev suhe gostote in vsebnosti vlage (po TSC 06.711:2001) ter nosilnosti s krožno obremenilno ploščo s padajočo lahko utežjo za določitev dinamičnega deformacijskega modula (po TSC 06.720:2003) (Likar et al., 2020).

Lizimetrov nismo zapolnili z materialom do vrha, da ne bi prihajalo do preliivanja površinskega odtoka padavinske vode z zgornje površine kompozita izven zajemnega dela lizimetrov, kar bi lahko predstavlja težavo pri izračunih vodne bilance. Pri kompozitih, ki smo jih zgostili z vibracijsko ploščo in/ali nabijalcem, smo vgradnjo krovne plasti zaključili 10 do 20 cm pod zgornjim robom lizimetra. Debelina kompozitov, ki smo jih vgradili brez zgoščanja je nekoliko večja, ker je bil odmik krovne plasti od roba lizimetra manjši. Ti kompoziti imajo večji koeficient vodoprepust-

nosti, zato je problem zastajanja vode na njihovi površini manjši in zato preliivanja vode zaradi površinskega odtoka preko roba lizimetra ni pričakovati.

Po vrhu vgrajenih kompozitov smo položili drenažni geosintetik in nanj nasuli sloj kremenčevega peska frakcije 4/8 mm v debelini 20-30 cm (sl. 1). Zaključni zaščitni sloj je sicer predviden tudi pri realni vgradnji kompozitov v sanacijski zasip v podjetju TERMIT. S tovrstno zasnovo lizimetra smo preprečili izrazit vpliv osončenosti in vetra na evaporacijo, kar bo potrebno kritično upoštevati pri modelih vodne bilance.

Vzpostavitev opazovanj kemične sestave izcednih vod

Načrt vzpostavitve opazovanj kemične sestave izcednih vod je bil sestavljen iz treh delov (sl. 5). V prvem sklopu smo opravili laboratorijske preskave preučevanih kompozitov. Sledilo je načrtovanje in konstrukcija lizimetrov z montažo opreme. V tretji fazi pa je sledilo izvajanje opazovanj kemične sestave izcednih vod. Na sliki 5



Sl. 4. Mešanje kompozita in njegova vgradnja v lizimetre, zgoščevanje z nabijalcem in vibracijsko ploščo.

Fig. 4. Mixing of the geotechnical composite and its installation into lysimeters, compaction with a rammer and a vibrating plate.

so podrobneje predstavljene aktivnosti vseh treh stopenj z opisom pričakovanih rezultatov. Eden od ciljev izgradnje eksperimentalnega polja je bil pridobivanje vhodnih podatkov za nadaljnjo simulacijo transporta potencialnih onesnaževal (sproščenih iz geotehničnih kompozitov) v vodonosnih plasteh. Zanima nas usoda teh snovi v tipičnem medzrnskem vodonosniku ter primerjava z usodo istih snovi v razpoklinskem vodonosniku.

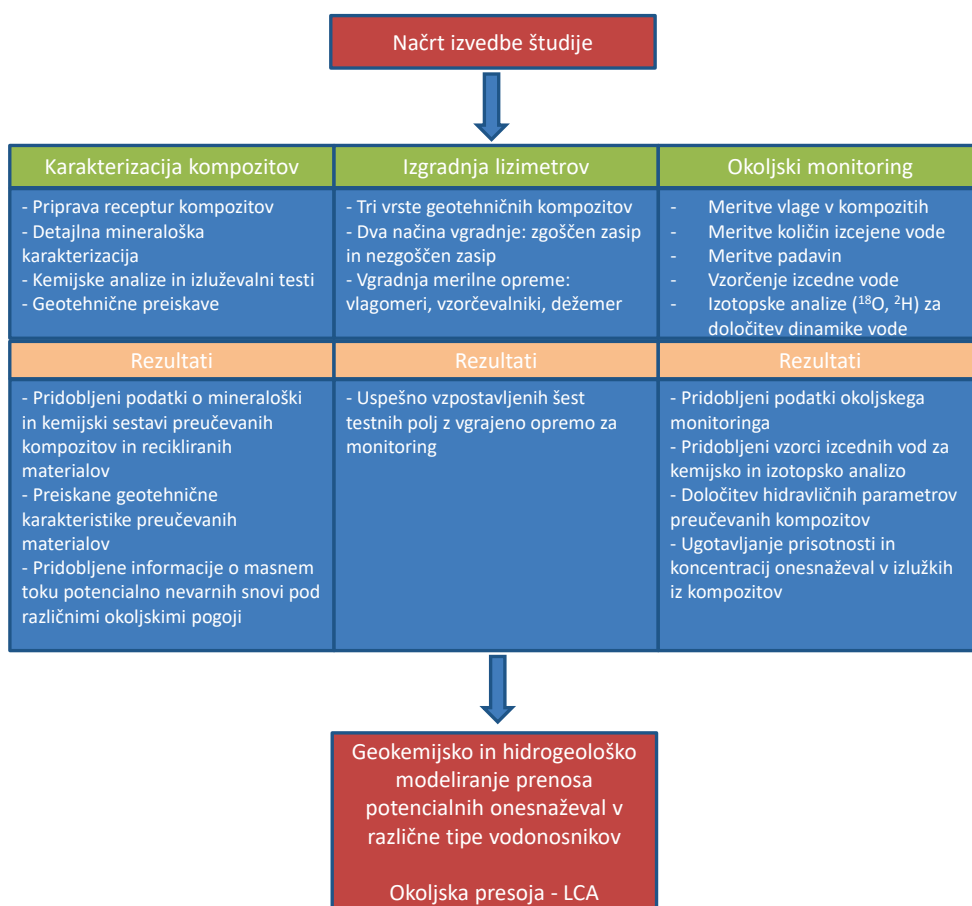
Da bi zagotovili učinkovito spremljanje dinamike izcedne vode smo lizimetre opremili s sondami za meritev vlage in temperature v geotehničnih kompozitih. Zgornjo sondo smo vtisnili 25 cm pod površjem kompozita. Drugo sondo smo v kompozit vtisnili 20 cm nad dnom kompozita (sl. 1). Na podlagi podatkov o naraščanju vlage v dveh točkah v profilu kompozita po vsakem padavinskem dogodku, lahko sklepamo na dinamiko vodnega toka skozi zasip. Namen meritve vlage v kompozitu je spremljati njen vpliv na izluževanje in učinek imobilizacije.

Izcedno vodo zbiramo v plastičnih zbiralnikih, ki so bili skonstruirani ob iztokih iz drenažnih cevi. Sam zbiralnik predstavlja plastičen rezervoar volumna 1000 litrov, ki je namenjen meritvam količin izcedne vode in vzorčenju vode za namen ugotavljanja kemijskih parametrov in

izotopskih analiz. Vzorčenje vode bo potekalo vsaj eno leto in sicer na določene časovne intervale (dva tedna ali en mesec, odvisno od količine padavin).

Ob lizimetrih smo postavili vremensko postajo s termometrom in zbiralnikom vzorcev dežja ter registratorjem intenzivnosti padavin. Najbližja opazovalna postaja Agencije Republike Slovenije za okolje se nahaja v Moravčah, ki je od lokacije postavitve lizimetrov oddaljena 2-3 km. Padavinski podatki, zbrani na vremenski postaji, so pomembni za izračun vodne bilance, torej za ugotavljanje režima infiltracije padavin v proučevane zasipe iz kompozitov. Vzorce padavinske vode iz vremenske postaje in vzorce izcedne vode bomo analizirali glede na izotopsko sestavo kisika in vodika. Določili bomo izotopsko sestavo kisika - ^{18}O in devterija - ^2H v padavinski in izcedni vodi. Glede na vsebnost izotopov kisika - ^{18}O in devterija - ^2H je možno sklepati na hitrost pretakanja prenikajoče vode, oziroma na zadrževalni čas vode v kompozitni matrici (Mali & Urbanc, 2006).

Končni cilj raziskave je, da na podlagi zbranih podatkov izvedemo geokemični in hidrogeološki model (simulacijo) usode in transporta snovi, ki se sproščajo iz preiskovanih geotehničnih



Sl. 5. Načrt izvedbe okoljskega monitoringa in študije.

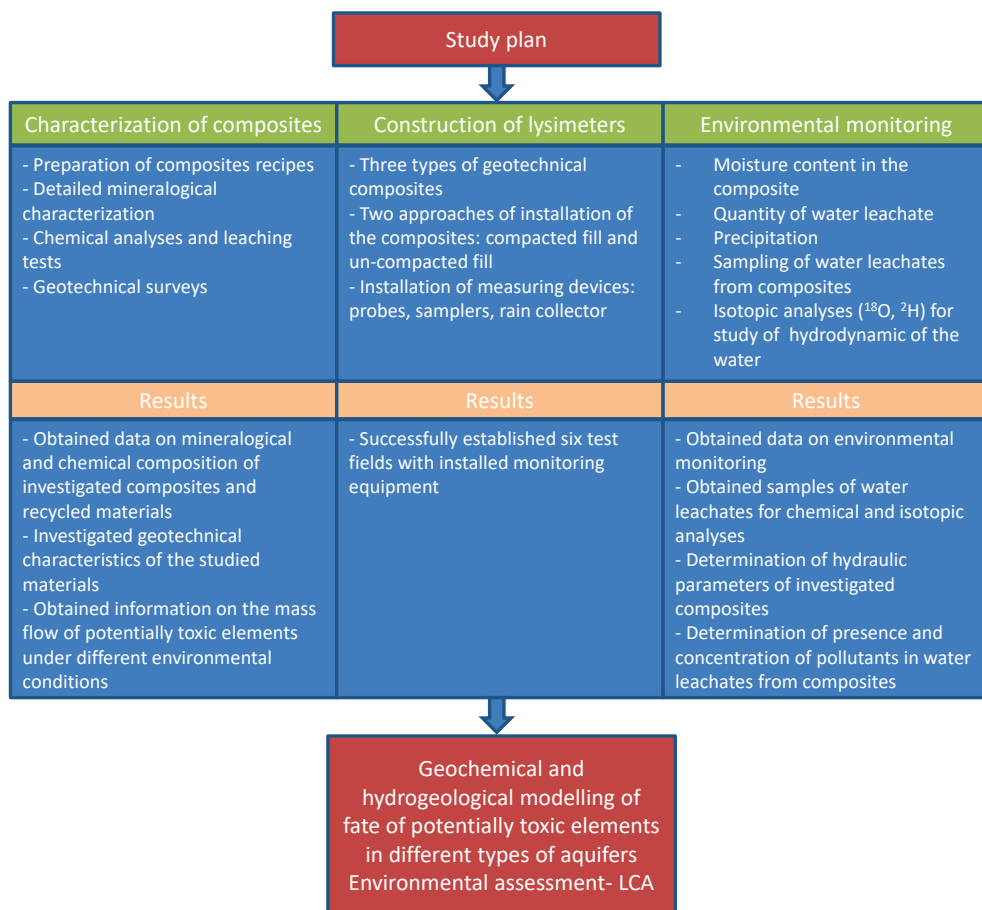


Fig. 5. Environmental monitoring and study plan.

kompozitov (sl. 5). Na podlagi rezultatov bomo lahko izpeljali metodološke novosti za izboljšanje metod ocenjevanja vplivov na okolje. Novosti so zaželeno predvsem pri modeliranju mobilnosti potencialno nevarnih snovi v zemljini (povezano z oceno vnosa potencialno nevarnih snovi v podzemno vodo). Izboljšave metod analize življenjskega cikla (LCA) so zelo pomembne, saj je LCA ena najbolj uveljavljenih metod za ocenjevanje okoljskih obremenitev.

Zaključki

V prispevku smo prikazali način izvedbe terenskega laboratorija za spremljanje izcednih voda iz geotehničnih nasipov iz recikliranih odpadkov. V šestih lizimetrih smo vzpostavili sistem monitoringa izcedne vode iz teh kompozitov. Vzpostavljen sistem je zanesljiv, poleg tega je za investitorja oziroma uporabnika cenovno ugoden in časovno sprejemljiv. Namen predstavljene raziskave je izvajanje meritev pretakanja vode v geotehničnih kompozitih ali drugih gradbenih materialih ter zbiranje vzorcev izcedne vode za analizo kemijskih parametrov. Ti parametri so neposredno povezani z izluževanjem potencialno nevarnih snovi iz gradbenih materialov. Zanima nas tudi vpliv hidroloških pogojev na izluževanje.

Podatki o izluženih potencialno nevarnih snoveh in njihovi koncentraciji v izcedni vodi bodo v prihodnje uporabljeni kot vhodni podatki za geokemijski model. S pomočjo numeričnega modela bomo simulirali masni tok potencialno nevarnih snovi v različnih tipih vodonosnikov. Zanima nas usoda oziroma mobilnost potencialno nevarnih snovi v nezasičeni coni različnih tipov vodonosnikov in vnos teh snovi v zasičeno cono.

Zahvala

Terenski laboratorij z opisanimi lizimetri je bil postavljen v okviru aplikativnega raziskovalnega projekta „Vpliv geotehničnih zasipov iz recikliranih materialov na podzemno vodo“ (L1-9190) sofinanciranega s strani Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije. Sofinancerji projekta s področja gospodarstva so TERMIT d.d., HMEZAD-TMT d.d., Javno podjetje VOVOVOD KANALIZACIJA SNAGA d.o.o. in Komunala Metlika d.o.o.

Zahvala gre osebjem iz podjetja TERMIT, ki so pomagali pri postavitvi testnih polj, ter Žigi Bevcu, Juretu Rožiču, Franciju Smrtniku, Mihi Uršiči in Lauri Vovčko z Zavoda za gradbeništvo, ki so sodelovali pri vgradnji kompozitov ali pri laboratorijskih preiskavah.

Literatura

- Abdou, H.M. & Flury, M. 2004: Simulation of water flow and solute transport in free-drainage lysimeters and field soils with heterogeneous structures. *European Journal of Soil Science*, 55/2: 229–241. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2004.00592.x>
- Albright, W.H., Benson, C.H. & Apiwantragoon, P. 2012: Field Hydrology of Landfill Final Covers with Composite Barrier Layers. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 139/1:1-12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000741](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000741)
- Birgisdóttir, H., Pihl, K.A., Bhandar, G., Hauschild, M.Z. & Christensen, T.H. 2006: Environmental assessment of roads constructed with and without bottom ash from municipal solid waste incineration. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 11/5: 358–368. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2006.07.001>
- Cerar, S. & Bavec, Š. 2019: Analiza vpliva vgrajenega sanacijskega materiala na rekultivacijo opuščene peskokopa. *Acta agriculturae Slovenica*, 114/2: 293–311. <https://doi.org/10.14720/aas.2019.114.2.14>
- Corwin, D.L. & Le Mert, R.D. 1994: Construction and evaluation of an inexpensive weighing lysimeter for studying contaminant transport. *Journal of Contaminant Hydrology*, 15/1-2: 107–123. [https://doi.org/10.1016/0169-7722\(94\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0169-7722(94)90013-2)
- Fifer Bizjak, K., Šepetavc, J., Mladenovič, A., Likar, B. & Lenart, S. 2019: Uporaba papirniških recikliranih materialov pri izgradnji geotehničnega objekta = The use of recycled materials from paper production in civil engineering: EU projekt Paperchain. In: Prebil Bašin, P., Jamnik, T. & Kličič, S. (eds.): Med krožnim, bio in digitalnim: zbornik povzetkov = Between circular, bio and digital: book of abstracts, 23. dan slovenskega papirništva in 46. mednarodni letni simpozij Društva inženirjev in tehnikov papirništva Slovenije (DITP), 20. –21. november 2019, Postojna, Ljubljana: GZS, ZPPPI, DITP: 53–54.
- Hansen, J.B., Holm, P.E., Hansen, E.A. & Hjelm, O. 2000: Use of lysimeters for characterisation of leaching from soil and mainly inorganic waste materials. Nordtest Technical Report 473.
- Howell, T.A. 2005: Lysimeter. *Encyclopedia of Soils in the Environment*, 2005 <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/lysimeters>
- Koroša, A., Brenčič, M. & Mali, N. 2020: Estimating the transport parameters of propyphenazone, caffeine and carbamazepine by means of a tracer experiment in a coarse-gravel unsaturated zone. *Water research*, 175. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115680>
- Likar, B., Brodnik, M. & Smrtnik, F. 2020: Poročilo o rezultatih geomehanskih laboratorijskih preiskav vzorcev kompozita TERSAN in kontrole vgrajevanja. Zavod za gradbeništvo Slovenije, Ljubljana: 13 p.
- Luthy, R.H. et al. 2003: Bioavailability of contaminants in soils and sediments, Processes, tools, and applications. Committee on Bioavailability of Contaminants in Soils and Sediments NRC. Washington DC, USA: The National Academies Press: 432 p.
- Mali, N. 2002: Opazovanje transporta vode v nezasičeni coni – primer lizimetra v Selniški dobri. *Geologija*, 45/2: 465–470. <https://doi.org/10.5474/geologija.2002.049>
- Mali, N., Urbanc, J. & Leis, A. 2007: Tracing of water movement through the unsaturated zone of a coarse gravel aquifer by means of dye and deuterated water. *Environmental geology*, 51/8: 1401–1412. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0437-4>
- Mali, N. & Urbanc, J. 2006: Uporaba stabilnih izotopov za študij toka podzemne vode v nezasičeni coni prodnega vodonosnika Selniške Dobrave = The use of environmental isotopes in groundwater flow study in the unsaturated zone of the Selniška Dobrava coarse gravel aquifer (Slovenia). *Geologija*, 49/2: 371–381. <https://doi.org/10.5474/geologija.2006.026>
- Mladenovič, A. 2018: Uporaba recikliranih odpadkov pri sanaciji površinskih rudniških prostorov. *Mineralne surovine v letu 2017, leto 14, št. 1: 177–180.*
- Mladenovič, A. & Mauko Pranjič, A. 2016: Deponije rudarskih in industrijskih odpadkov so dragoceni vir surovin. *Mineralne surovine v letu 2015, leto 12, št. 1: 158–161.*
- Mladenovič, A., Hamler, S. & Zupančič, N. 2017: Environmental characterisation of sewage sludge/paper ash-based composites in relation to their possible use in civil engineering. *Environmental science and pollution research international*, 24/1: 1030–1041. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7843-2>
- Oblak, T., Ščančar, J., Vahčić, M., Zuliani, T., Mladenovič, A. & Milačič, R. 2011: Environmental impacts of asphalt and cement composites with addition of EAF dust = Okoljski vplivi asfaltnih in cementnih

- kompozitov z dodatkom EOP-prahu. *RMZ - Materials and geoenvironment: periodical for mining, metallurgy and geology*, 58/2: 181-192.
- Oprčkal, P., Mladenovič, A., Zupančič, N., Ščančar, J., Milačič, R. & Zalar Serjun, V. 2020: Remediation of contaminated soil by red mud and paper ash. *Journal of Cleaner Production*, 256: 120440. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120440>
- Saporito, L.S., Bryant, R.B. & Kleinman P.J.A. 2016: A Protocol for Collecting and Constructing Soil Core Lysimeters. *Journal of Visualized Experiments*, 112: 53952. <https://doi.org/10.3791/53952>
- Schwab, O., Bayer, P., Juraske, R., Verones, F. & Hellweg, S. 2014: Beyond the material grave: Life Cycle Assessment of leaching from secondary materials in road and earth constructions. *Waste Management*, 34/10: 1884-96. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.04.022>
- Singh, G., Kaur, G., Williard, K., Schoonover, J. & Kang, J. 2017: Monitoring of Water and Solute Transport in the Vadose Zone: A Review. *Vadose Zone Journal*, 17. <https://doi.org/10.2136/vzj2016.07.0058>
- Smolar, J., Maček, M. & Petkovšek, A. 2016: Geotechnical and Environmental Characterization of Boiler Slag as Fill Material. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 142/8. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001489](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001489)
- Turk, J., Mladenovič, A., Knez, F., Bras, V., Šajna, A., Čopar, A. & Slanc, K. 2014: Tar-containing reclaimed asphalt e Environmental and cost assessments for two treatment scenarios. *Journal of Cleaner Production*, 81: 201-210.
- Turk, J., Cotič, Z., Mladenovič, A. & Šajna, A. 2015: Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA. *Waste Management*, 45: 194-205. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.035>
- Unold von, G. & Fank, J. 2008: Modular Design of Field Lysimeters for Specific Application Needs. *Water Air Soil Pollut: Focus*, 8: 233-242. <https://doi.org/10.1007/s11267-007-9172-4>



Step-drawdown tests in exploitation wells for thermal and mineral water – Case study from Slovenia

Črpalni preizkusi v korakih v eksploatacijskih vodnjakih za rabo termalne in mineralne vode – študija primera Slovenije

Luka SERIANZ^{1,2}, Nina RMAN¹ & Mihael BRENČIČ^{3,1}

¹Geological Survey of Slovenia, Dimičeva ulica 14, SI-1000 Ljubljana, Slovenia; e-mail: luka.serianz@geo-zs.si

²Faculty of Civil and Geodetic Engineering, University of Ljubljana, Jamova c. 2, SI-1000 Ljubljana, Slovenia

³Faculty of Natural Sciences and Engineering, University of Ljubljana, Aškerčeva c. 12, SI-1000 Ljubljana, Slovenia

Prejeto / Received 19. 11. 2019; Sprejeto / Accepted 13. 11. 2020; Objavljeno na spletu / Published online 7. 12. 2020

Key words: step-drawdown test, mineral water, thermal water, well performance, Slovenia

Ključne besede: črpalni preizkus v korakih, mineralna voda, termalna voda, učinkovitost vodnjaka, Slovenija

Abstract

A comparative analysis of step-drawdown tests was performed in order to estimate the well performance in Slovenian thermal and mineral water wells. Tests were performed in 30 wells, each having its own maximum production rate determined in the concession decrees. The main focus of well performance analysis, using graphical analysis of the Jacob approximate equation, was to estimate the adequacy of the wells production rate as well as to identify possible changes in the technical status of the wells over years. 5 of total 30 wells were not included in the analysis due to technical issues during test performance. Well performance analysis includes the calculation of nonlinear well losses related to turbulent flow and linear head loss (aquifer and well) assumed to be related to laminar flow. Results indicate that the ratios between nonlinear well losses and linear head (well and aquifer) losses, in this paper referred as laminar losses, are from 6.9 % to 97.4 %. Laminar losses parameter suggests, all investigated wells were classified with either good (11 wells), medium (7 wells) or poor (7 wells) performance. The addressed analysis represents a very important basis for further thermal and mineral water extraction, e.g. optimizing the maximum allowed production rate as granted in concession decrees and diagnose potential changes in the technical status of each well.

Izvelek

Za oceno učinkovitosti eksploatacijskih vodnjakov za rabo termalne in mineralne vode je bila izvedena primerjalna analiza črpalnih preizkusov v korakih. Črpalni preizkusi v korakih so bili izvedeni v 30 vodnjakih, pri čemer je bila najvišja količina črpanja v posameznem vodnjaku enaka najvišji količini, ki izhaja iz koncesijskih uredb. Glavni namen analize učinkovitosti vodnjakov, ki je temeljila na Jacobovi grafični metodi obdelave črpalnega preizkusa v korakih, je oceniti in preveriti ustreznost sedaj dovoljenih količin črpanja, hkrati pa tudi določiti morebitne spremembe v tehničnem stanju vodnjakov. Pet od skupno 30 vodnjakov, zaradi tehničnih težav med samo izvedbo črpalnega preizkusa v korakih ni bilo vključenih v analizo. Sama analiza učinkovitosti vodnjakov temelji na izračunu nelinearnih izgub vodnjaka kot posledica turbulentne komponente toka in linearnih tlačnih izgub (vodonosnika in vodnjaka), privzetih kot posledica laminarne komponente toka. Rezultati analize kažejo, da so razmerja med nelinearnimi in linearnimi izgubami, ki so v tem članku opredeljena kot laminarne izgube, med 6,9 % in 97,4 %. S pomočjo parametra laminarnih izgub smo preiskane vodnjake ocenili z dobro (11), srednjo (7) ali slabo (7) učinkovitostjo. Obravnavana analiza predstavlja zelo pomembno podlago za nadaljnje črpanje termalne in mineralne vode, npr. za morebitno optimiziranje najvišje dovoljene količine izkoriščanja, ki izhajajo iz koncesij, in za diagnosticiranje potencialnih sprememb v tehničnem statusu posameznega vodnjaka.

Introduction

In Slovenia, many mineral and thermal water resources are found (Lapanje & Rman, 2009), however their management was not very efficient in the past (Rman et al., 2011, 2015). Thermal water is defined in the Water Act (Official Gazette, Nos. 67/02, 2/04 – ZZdrI-A, 41/04 – ZVO-1, 57/08, 57/12, 100/13, 40/14, 56/15 and 62/20) as a groundwater which exceeds the temperature of 20 °C at its outflow to the surface. Three types of low-temperature thermal systems occur here: warm spring systems in fissured and karstified carbonate aquifers, aquifers in fissured carbonate and metamorphic rocks in basement rocks below sedimentary basins, and intergranular aquifers in sedimentary basins (Lapanje & Rman, 2009). Two thermal water regional flow systems are exploited by several users: mineral and thermal water bearing sandy aquifers in the Mura-Zala sedimentary basin in NE Slovenia and thermal water in dolomite aquifers in the basement of the Kriško-Brežice sedimentary basin (Rman et al., 2019). Mineral water is defined in the Water Act (Official Gazette, Nos. 67/02, 2/04 – ZZdrI-A, 41/04 – ZVO-1, 57/08, 57/12, 100/13, 40/14, 56/15 and 62/20) as groundwater which fulfils the written criteria and originates from a well, spring or capture but the criteria are not listed anywhere. In hydrogeological practice, we usually classify mineral waters as the ones having more than 1 g/l of total dissolved solids or more than 250 mg/l of CO₂. Confusion is often caused because the term natural mineral water is also used in legislation. It is used for bottled groundwaters according to the Rules on natural mineral water, spring water and table water (Official Gazette, Nos. 50/04, 75/05 and 45/08 – ZKme-1), which do not have a unique hydrogeological classification similar to aforementioned. In this paper, we use expression mineral water for a group of wells which produce waters for beverages. most of them are enriched in CO₂ and therefore also have higher mineralization.

It would be expected that a reliable resource assessment is performed prior to the start of exploitation but, in practice, the approach was rather different in the past. At sites with decades-long exploitation of mineral and thermal waters most water-producing objects (mostly wells) were not properly and/or systematically tested on capacity, if tested at all. No systematic research has yet been conducted on possible differences in hydraulic properties of production wells tapping intergranular or fissured aquifers. Average age of more than half of producing thermal and mineral

water wells is above 30 years (Rman & Lapanje, 2018). In some cases, operational issues such as mineral precipitation, corrosion, gas eruptions and silt clogging are also reported. As it is necessary to determine whether the reasons for some noticed changes in well capacity are in deterioration of the aquifer state or the object itself (Kralj et al., 2009; Rman, 2014; Szócs et al., 2013), it is necessary to systematically monitor well's efficiency and to timely implement measures for preventing possible deterioration.

Considering the above, a methodology for comparison of well's performance over a lifetime is reasonable to be applied systematically in order to, in the event of a change, identify the need for well revitalization or improvement of the aquifer's status. This approach was identified also by the Slovenian Ministry of the Environment and Spatial Planning which implements decrees on the concession for the use of thermal water according to the Water Act (Official Gazette, Nos. 67/02, 2/04 – ZZdrI-A, 41/04 – ZVO-1, 57/08, 57/12, 100/13, 40/14, 56/15 and 62/20). There is a difference between the ones issued prior to the year 2015 (e.g. Official Gazette, No. 125/04) and afterwards (e.g. Official Gazette, Nos. 103/15 and 14/18). The newest Decrees contain more extensive monitoring requirements. Continuous monitoring of groundwater level, temperature and production rate, waste water temperature and quantity, plus regular water chemical and isotopic composition have to be determined annually. When annual abstraction at a site exceeds 200,000 m³/year monitoring data have to be online, daily transmitted to the database of the Slovenian Environmental Agency. Requirements include also systematic measurements of hydraulic characteristics of production wells (efficiency and specific capacity) in the period of every 3 and 6 years.

A single-well step-drawdown test, also called step test, is used to quantify well performance criteria, such as well efficiency and its specific capacity, and can provide an estimate of the maximum yield of the well (Abdalla & Moubark, 2018). Therefore, the step-drawdown test is one of the most frequently performed types of pumping test, particularly in the case of single well (Kawecki, 1995). Jacob (1947) was the first to present the conceptual formulation of step-drawdown test. Since that time, a number of articles were published in order to refine interpretation (Rorabaugh, 1953; Bierschenk, 1963; Lennox, 1966; Mogg, 1969; Sheahan, 1971; Birsoy and Summers, 1980; Gupta, 1989; Helweg, 1994

and Kawecki, 1995). Those interpretations are based on graphical procedures, however some published papers on numerical analysis are also published (e.g. Louwyck et al., 2009).

In this paper, the summary results of testing of 30 mineral and thermal water wells in Slovenia are presented, which were performed in years from 2016 to 2018. The Jacob (1947) graphical method for step-drawdown test interpretation in controlled and variable abstraction conditions was used as described by Kruseman and De Ridder (1990) as it provides an approximation of specific capacity e.g. well capacity versus measured drawdown at different abstraction stages. The difference among mineral and thermal water wells, and fissured and intergranular aquifers was investigated. Appropriateness of the maximum allowed production rate as granted in concession decrees was compared to currently calculated value considering the actual technical status of the well.

Methodology

Theoretical background

Performance

Analytical approach

It is very likely that in the immediate vicinity of the well, due to nature of groundwater flow there may be a deviation from the Darcy law describing linear movement of fluid flow through a porous media. The deviation can be reflected as larger drawdown in producing well as the theoretical model could predict. It is assumed that the measured drawdown in a pumped well consists of two components: aquifer losses (linear) and well losses (linear and non-linear). For an ideally confined system with radial flow to well with constant discharge with no well losses the drawdown s , using Theis (1935) nonequilibrium formula is given by:

$$s(r_w, t) = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (1)$$

where Q is the discharge, t is the time and r_w is the true radius of the pumped well, T is aquifer transmissivity, $W(u)$ is the Theis well function (Theis, 1935) and:

$$W(u) = -0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + \dots \quad (2)$$

where

$$u = \frac{r_w^2 S}{4Tt} \quad (3)$$

where S is the storage coefficient. It was recognized that the terms beyond $\ln(u)$ in the expanded series of the well function $W(u)$ can be neglected if u is sufficiently small (i.e. large values of elapsed time). Jacob (1950) suggested an approximation of $u < 0.01$. When u is small the well function may be approximated by:

$$W(u) \cong \ln \frac{2.25Tt}{r_w^2 S} \quad (4)$$

Substituting (4.) in (1.) gives:

$$s(r_w, t) = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25Tt}{r_w^2 S} \quad (5)$$

Considering equation (5), the total well loss is than given by:

$$s_w = s(t) - s(r_w, t) \quad (6)$$

where s_w is the total well loss and $s(t)$ is the observed drawdown in the pumped well at time t .

Assuming that total drawdown in the well is a sum of s_1 , s_2 and s_3 as suggested in Figure 1 the proposed model would then be (7):

$$s(t) = B_1(r_w, t)Q + B_2Q + CQ^2 \quad (7)$$

where B_1 is the linear aquifer loss coefficient occurring in the area where the flow is laminar (T/L^2), B_2 is the linear well loss coefficient (T/L^2), C is the non-linear well loss coefficient in T^P/L^{3P-1} and P is an exponent of the well discharge (note: T is unit of time and L unit of length). All three coefficients are derived from the observation of the flow towards well. These are laminar and turbulent flow, or a combination of both. Laminar losses usually occur away from the boreholes, where the velocities are low, which is the case for linear aquifer losses. On the other hand the linear well losses occurs relatively close to well bore in the damage zone of the aquifer (e.g. caused by drilling), where the hydraulic conductivity is usually considerably lower than that of the aquifer. The larger the hydraulic conductivity difference, the more important is the value of the linear well losses within the parameter B . Although some authors (e.g. Williams, 1985) suggested that head losses through the damage zone are generally laminar, the arguments for such estimation are rather uncertain.

In practice if the »independent« aquifer properties are unknown, it is seldom possible to take B_1 and B_2 into account separately (Kruseman and

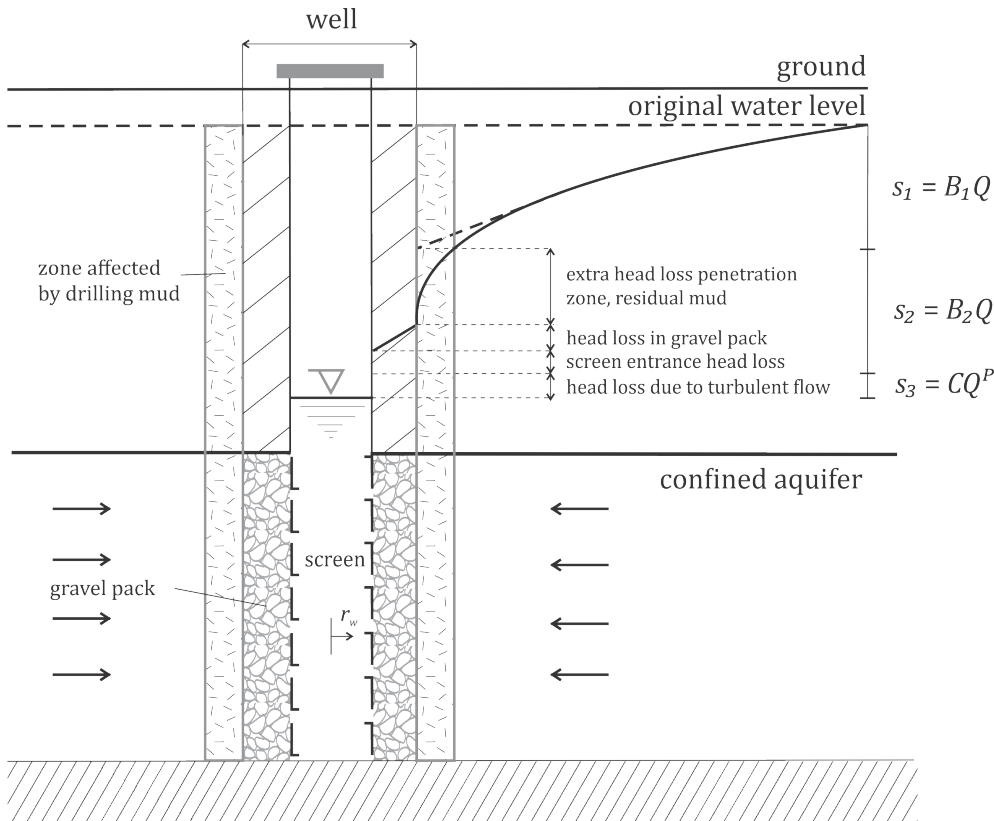


Fig. 1. Various components of head losses in a production well (modified from Kruseman and de Ridder, 1990).

Sl. 1. Različne komponente tlačnih izgub v črpalnem vodnjaku (prirejeno po Kruseman in de Ridder, 1990).

de Ridder, 1990). Therefore, we can determine B (B_1+B_2) as aquifer circulation loss coefficient representing linear losses related as suggested, mainly to laminar flow nature and the drawdown is than (8) (Rorabaugh, 1953):

$$s = BQ + CQ^P \quad (8)$$

where BQ and CQ^P are drawdowns due to linear and nonlinear losses respectively. According to Lennox (1966), the value of P is assumed to be in between 1.5 to 3.5, depending on the value of Q . Originally Jacob (1947) suggested that the total drawdown in the production well could be expressed as the sum of drawdown due to laminar flow (BQ) and drawdown due to production well turbulence (CQ^2). This model was applied for the step-drawdown tests interpretation in this research. According to Jacob the drawdown in pumping well can be defined as (9):

$$s = BQ + CQ^2 \quad (9)$$

In literature, the ratio of the aquifer head loss to the total head losses is expressed as a well efficiency (10):

$$E_w = \left[\frac{B_1 Q}{BQ + CQ^2} \right] \times 100\% \quad (10)$$

Values of $E_w \geq 70\%$ or more is usually considered acceptable and indicate a properly designed and developed well (Kresic, 1997). The well efficiency can be expressed both with the results of a step-drawdown and aquifer test. The latter is needed in order to determine the value of B_1 . In practice, only the drawdown measurements in a pumping well are usually available, therefore the value of B_1 cannot be determined. The substitution of B and C into equation (10) would overestimate the well efficiency since $B > B_1$. Driscoll (1986) therefore introduced parameter L_p representing laminar losses, which are interpreted as a ratio of the laminar head losses to the total head losses (11) (Kruseman and de Ridder, 1990):

$$L_p = \left[\frac{BQ}{BQ + CQ^2} \right] \times 100\% \quad (11)$$

In case of examined step-drawdown tests the values of B_1 and B_2 cannot be calculated, therefore the sum of linear well and aquifer losses is assumed as a parameter of linear head loss (BQ). Introducing the laminar loss (L_p) in order to evaluate the ratio between non-linear well loss and linear head loss, leads to assumption that linear well losses are also due to laminar flow. One could argue such simplification, but for the purpose of this research the conservative approach should satisfied the previous stated arguments.

Some researchers propose the comparison between wells based on range of C value (Walton, 1962) or C/B ratio (Bierschenk, 1963) in order to approximate well development indicating well deterioration and possible screen clogging. However, such comparison might work in case of large diameter wells, but it is not appropriate in our case remarking the uncertainties explained hereinafter. Mogg (1969) asserted that the magnitude of C should not be used as an indicator of whether or not the well is properly designed or effectively developed because the correlation of field data shows that C is inversely proportional to the product of the discharge rate and the specific capacity. In this paper we classify the well performance into three groups, according to L_p value: good well performance ($L_p > 70\%$), medium well performance ($30\% < L_p \leq 70\%$) and poor well performance ($L_p \leq 30\%$).

The relationship between the drawdown and discharge can be expressed as the *specific capacity* of a well, Q/s , which describes the productivity of both the aquifer and the well. The specific capacity is not a constant but decreases as production continues. Several factors affect the specific capacity e.g. aquifer characteristics (hydraulic conductivity and storage coefficient), hydraulic barriers, technical performance of the well (e.g. penetration of well) and effective well screen perforation. The Q/s ratio is useful also to compare pumping tests at different periods and allows predicting possible changes in well performance due to technical issues or variable hydraulic conditions in aquifers.

Step-drawdown test performance

In step-drawdown tests groundwater is extracted in a number of consecutive time-intervals during which the pumping rate is constant but increases steadily with the number of time-intervals (Driscoll, 1986). By plotting s/Q versus Q and fitting the straight line through the measurements points, the well coefficient C is given by the slope of the line and the aquifer loss coefficient B is equal to the intercept, considering $P = 2$ (Kruseman & de Ridder, 1990). The reliability of the derived value for C increases with the number of steps, since more data points are available to derive the slope of the straight line in the s/Q versus Q plot. The number of pumping steps is determined on the basis of known production rate, aquifer characteristics and available time interval for test performance, including pre-pumping interval and groundwater recovery when the well is not producing. All pumping steps have to be of same duration, usually 30 – 120 min or till drawdown stabilization in order to provide the minimal storativity effect (Kruseman and de Ridder, 1994). The maximum pumping rate has to be determined according to maximum exploitation rate of the well, or better should fit maximum pump capacity. The Jacob (1947) graphical method idea is that the drawdowns measured at the end of individual steps should be steady. However, in reality, drawdown in a pumping well seldom stabilises. As a result, the quasi-steady drawdown measured at the end of each step is generally used in the analysis (Louwyck et al., 2009).

Table 1. Basic information about the performed step-drawdown tests.
Tabela 1. Osnovne informacije o izvedbi črpalnih preizkusov v korakih.

Well num.	Aquifer ¹	WT ²	Date	N ³	Stab. ⁴	Well num.	Aquifer ¹	WT ²	Date	N ³	Stab. ⁴
1	I	T	22.02.2018	3	yes	16	F	T	28.08.2017	4	yes
2	I	T	14.12.2017	4	no	17	F	T	05.04.2017	3	yes
3	F	T	22.11.2017	4	yes	18	F	T	04.04.2017	3	yes
4	F	T	15.11.2017	4	yes	19	F	T	29.11.2017	3	no
5	F	T	30.01.2018	3	yes	20	F	T	28.11.2017	3	no
6	F	T	30.06.2017	3	yes	21	F	M	27.12.2017	3	yes
7	F	T	29.06.2017	3	yes	22	I	M	14.05.2016	3	yes
8	F	T	07.06.2017	3	no	23	I	M	13.05.2016	3	yes
9	F	T	29.06.2017	3	yes	24	I	M	07.05.2016	3	yes
10	F	T	15.11.2017	4	yes	25	I	M	20.04.2016	3	yes
11	I	T	05.12.2017	3	no	26	I	M	21.04.2016	3	yes
12	I	T	20.12.2017	3	no	27	I	M	25.04.2016	3	yes
13	I	T	19.12.2017	4	no	28	I	M	22.04.2016	3	yes
14	I	T	16.11.2017	3	no	29	I	M	03.05.2016	3	yes
15	F	T	06.07.2017	1	yes	30	I	M	26.04.2016	3	yes

¹Aquifer type: I = intergranular, F = fractured

²WT (Water type): T = thermal, M = mineral

³Number of pumping steps

⁴Water level stabilization before pumping

The Slovenian examples

Step-drawdown tests were performed in 30 wells in years 2016 (8 wells), 2017 (19 wells) and 2018 (3 wells). At some sites (users), several wells were tested (Fig. 2). In Slovenia, one third of tested wells exploit mineral water while the other two thirds exploit thermal water (Table 1). Half of tested wells produce water from intergranular aquifers (mostly sandy layers) and others from fractured aquifers (mostly dolomite). In general, three pumping steps were applied, while in six cases we were able to perform four pumping steps. In one case, the pumping rate was decreasing while the drawdown in the well progressed, therefore it was impossible to maintain the stable discharge during pumping. This case was not included in further analysis. All tested wells have been granted water concession and are active.

Age of tested wells at reference year 2017 is between 6-60 years (Table 2). Water temperature is up to 63 °C in exploitation wells for thermal water and up to 30 °C in exploitation wells for mineral water. Low to high mineralized water can be found in tested wells according to EC range of 391-14300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. CO_2 level is highest in exploitation wells for mineral water in intergranular aquifers. Prevailing Ca-Mg- HCO_3 water type in exploitation wells for mineral and thermal water in fracture aquifers is related to prevailing dolomite recharge area. Na-Cl water type can be found only in one well in the coastal area. Various water types can be found in intergranular aquifers from Ca-Mg- HCO_3 to Na-Ca- HCO_3 -Cl in wells exploiting mineral water and from Na- HCO_3 to Na- HCO_3 -Cl in wells exploiting thermal water.

Table 2. Summary information on well ages and basic physico-chemical composition of water for four aquifer type categories.

Tabela 2. Povzetek informacij o starosti vrtin in osnovnih fizikalno-kemijskih značilnostih vode za štiri tipe vodonosnikov.

Category	Well age (years)	T (°C)	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	CO_2 (g) (mg/l)	Water type
FM	6	12,5	400	nd	Ca-Mg- HCO_3
IM	10-46	10-30	650-6450	176-2420	Ca-Mg- HCO_3 to Na-Ca- HCO_3 -Cl
FT	7-49	21-40	391-14300	37-200	Ca-Mg- HCO_3 to Na-Cl
IT	12-60	55-63	600-6813	20-50	Na- HCO_3 to Na- HCO_3 -Cl

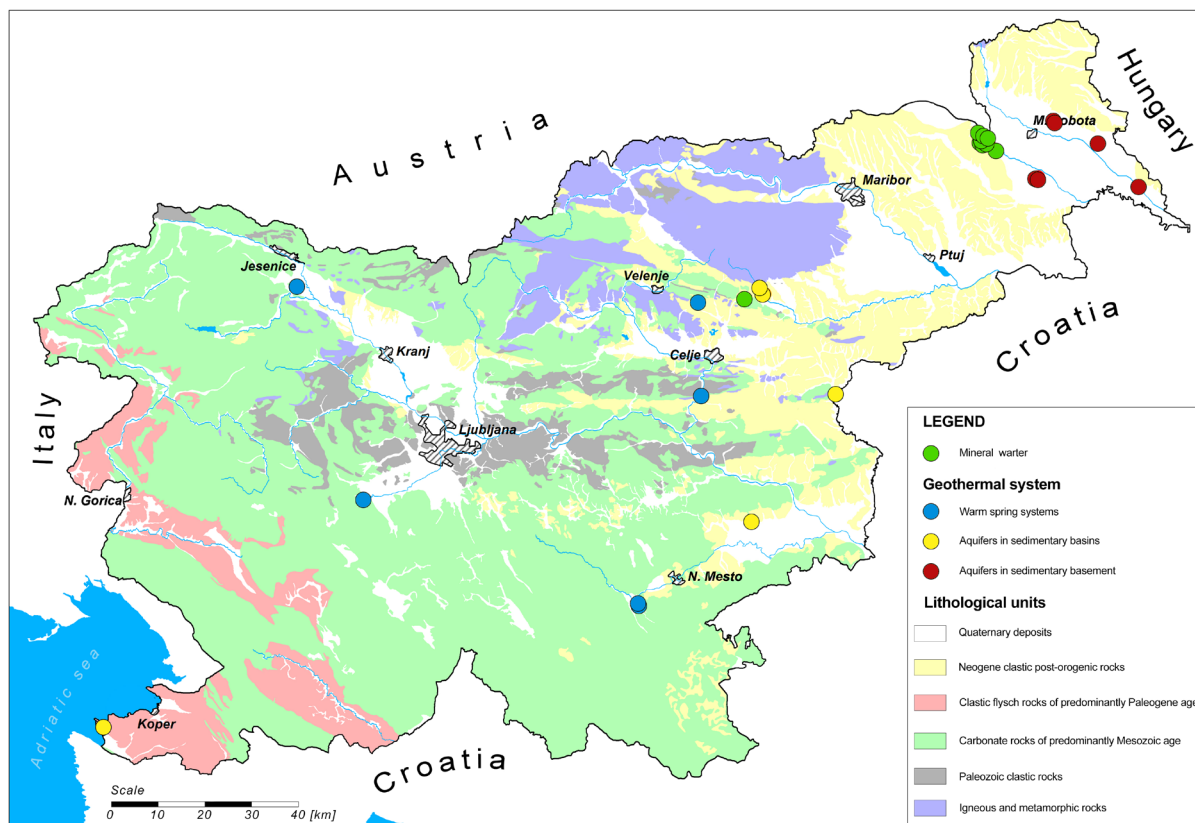


Fig. 2. Locations of tested wells.

Sl. 2. Lokacije testiranih vrtin.

All tests were performed taking into account the recommendation from the literature (e.g. Kruseman & De Ridder, 1990) as well as international standards (ISO 22282-4:2012). Nevertheless, there were several issues identified during step test performance, mainly due to technical issues or limits depending on each site. Most common issue was inappropriate installment of measurement probes and water meters. Eventually the situation improved or we used our own probes during tests performance. Second issue was the available time for test performance. Almost all wells are active and the water exploitation is constant. Therefore, the time available for test performance (discharge reduction) was short and in some cases the recovery time prior to pumping for the test was insufficient to achieve an equilibrium static head before pumping started. It was evaluated that the water level stabilization before pumping was achieved in 70 % of wells, while in other remaining wells the static head was at least very close to stabilization. During the step test performance, the stabilization level at each step was achieved only in 44 % of wells, even if the pumping step duration was

in between 1.5 – 2 hours in 85 % of tests. That is a consequence of relative limited and slow water flow towards wells which is typical for investigated aquifers with a very low recharge rate. The pumping rate at each well was roughly determined preliminary, before step test performance. Still, in 37 % cases, the actual applied pumping rate was different to preliminary proposed, most commonly due to unknown technical characteristics of water pump prior to the tests.

Results and discussion

An example of a case study

To illustrate the applied analysis of step-drawdown test, an example of successfully performed pumping test in a well drilled in the intergranular aquifer is presented. The test was performed with four pumping rates: 6 l/s, 17.1 l/s, 22.3 l/s and 27.9 l/s. Each rate was maintained for 1.5 h (Fig. 3a). Measured drawdown versus elapsed time after pumping began was then plotted on semi-logarithmic graph (Fig. 3b). Each step was extrapolated with a straight line beyond the period of pumping in order to obtain the incre-

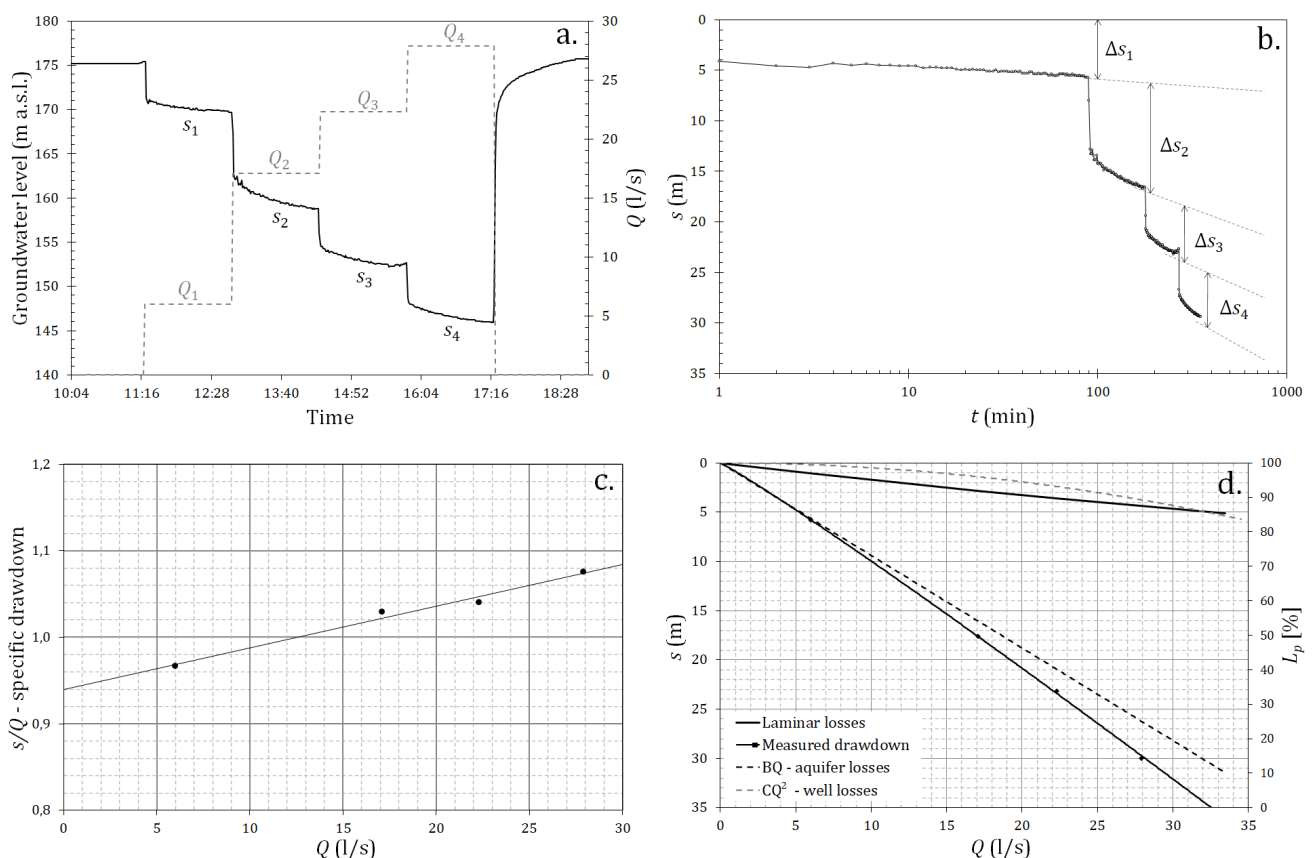


Fig. 3. Example of a step test performance: a.) field measurements of GWL and pumping rates, b.) drawdown versus time since pumping started, c.) specific drawdown versus pumping rate and d.) graphical interpretation of the step test analysis.

Sl. 3. Primer izvedbe črpalnega preizkusa v korakih: a.) terenske meritve gladine podzemne vode in črpane količine, b.) znižanje v času od pričetka črpanja, c.) specifično znižanje v odvisnosti od črpane količine in d.) grafična interpretacija analize črpalnega preizkusa v korakih.

mental drawdown caused by different pumping rates. Then s/Q (specific drawdown) versus corresponding value of Q was plotted on arithmetic graph (Fig. 3c). This approach is used to determine coefficient B (linear losses) and C (nonlinear losses) and was proposed by Hantush (1964) and Bierschenk (1963). Plotting the s/Q values against the corresponding values of Q gave a straight line with a specific slope representing the C coefficient, while the coefficient B represents the value at $Q = 0$ l/s. The data falls on a straight line (Fig. 3c). The values of identified coefficients were determined as $B = 0.9397$ s/m² in $C = 0.0048$ m·s²/l² in this case respectively. Using those coefficient values, we can write the drawdown approximate equation (12):

$$s / Q = 0.0048Q + 0.9397 \quad (12)$$

where

$$s = 0.0048Q^2 + 0.9397Q \quad (13)$$

hence this is a shape of Jacob equation and represents estimation of drawdown in the well within the time interval of 1.5 h.

Fig. 3d represents drawdown measurements, calculated linear losses (BQ), well losses (CQ^2) and portion of laminar losses for each pumping rate. In the example a drawdown of 30 m was observed at maximum discharge rate of $Q = 27.9$ l/s. Applying the Jacob equation, the observed drawdown is a consequence of linear loss (aquifer and well loss), which theoretically is approx. $BQ = 26.22$ m, and non-linear well loss, which is approx. $CQ^2 = 3.74$ m. At maximum pumping rate the well performance was determined as good, while the 87.5 % of measured aquifer at maximal pumping rate can be attributed to the aquifer loss. Also, the laminar losses decrease slowly.

The average exploitation rate of presented well at normal production is about 3 l/s during summer and 28 l/s during winter. High laminar losses mean that this pumping rate does not significantly affect well performance neither reaches the aquifer production capacity. Therefore, the winter exploitation rate of 28 l/s for the tested well does not exceed the well maximum capacity.

Still, each well reflects its own characteristics, therefore it is almost impossible in practice to consider all wells with the same conceptualization. It must be emphasized that step test can only help to determine production capacity and performance of the well and is not intended to determine sustainable production rates of the aquifer.

Comprehensive summary analysis

Well performance

The results of well performance analysis are available for 26 of total 30 tested wells (Table 2). Step-drawdown tests in wells 15, 18 and 21 have been subjected to technical issues, either due to inappropriate equipment installation or reduction of pump efficiency due to large drawdowns which resulted in unstable pumping rate. Figure 4 shows the distribution of well loss coefficient C separately for thermal water wells in fractured and integranular aquifers and for mineral water wells. The values are ranging between 0.37 and 447 min²/m⁵ (conversion 1 min²/m⁵ = 0.0036 m·s²/l²). In the first decade $C < 1$ min²/m⁵ there are 2 wells, 9 wells in $C = 1 - 10$ min²/m⁵, 9 wells in $C = 10 - 100$ min²/m⁵ and 7 wells in $C > 100$ min²/m⁵. Some researchers propose the comparison between wells based on range of C value in order to approximate well development indicating well deterioration and possible screen clogging (Walton, 1962). But well loss coefficient C is empirically derived and therefore depending on several factors as for example effective open area of perforation. Each well was designed, constructed, and completed for specific reasons in different areas under varying hydrogeological conditions, so direct comparison among wells is not possible. For example, the wells exploiting mineral water would according to high C value ($C = 10 - 100$ min²/m⁵) indicate very poor well development, but still in same cases the laminar losses are high. Hence those mineral water wells are usually drilled with small diameter since the production rate is often lower than 5 l/s. As suggested by Mogg (1969) the low discharge rates in poor formations would show high values of C , which is often the case in mineral water wells.

Another parameter which might also affect the comparison between wells is the penetration factor (Bierschenk, 1963). The partial penetration increases the drawdown in a well because some of the water that enters the well must percolate upward or downward from the screen or perforations. Water percolating vertically to a well moves through a greater distance than if it had percolated horizontally and across planes of greater resistance (i.e. horizontal permeability is greater than vertical permeability). Therefore, using C values for evaluation of wells status over time would only work in wells of similar technical properties. Consequently, in the presented case it would not be appropriate.

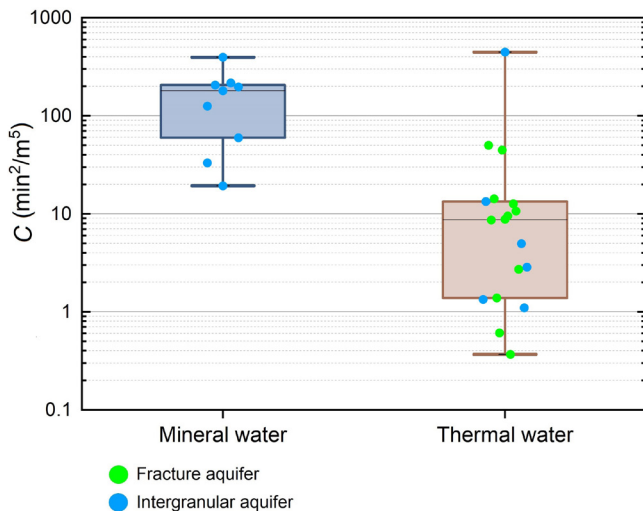


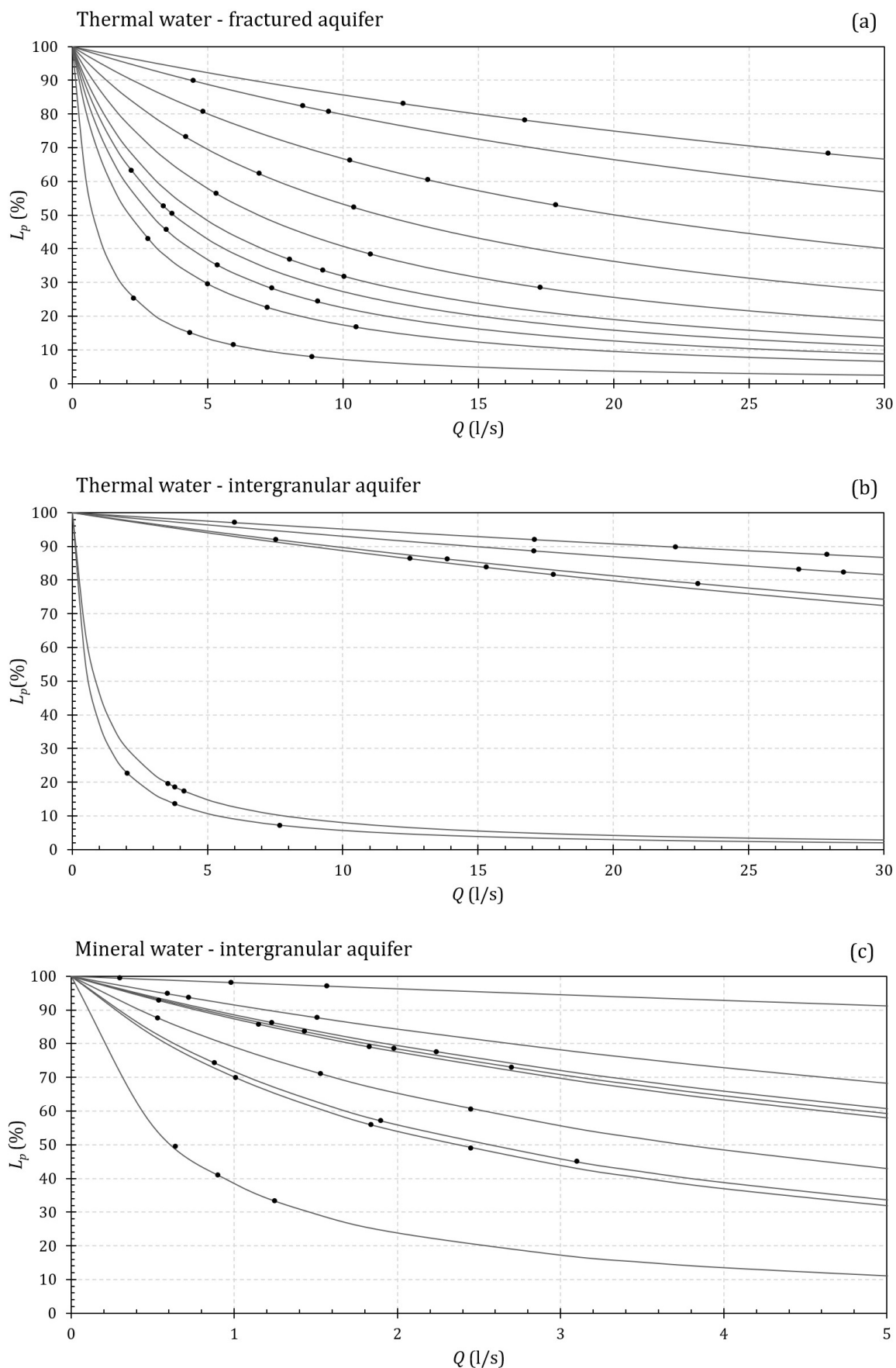
Fig. 4. Distribution of C coefficient for different water and aquifer types.

Sl. 4. Porazdelitev koeficienta C za različne tipe vod in vodonosnikov.

Graphical analysis led to production of curves representing the interpolation of laminar losses in individual wells (Fig. 5). Each figure includes curves for the wells exploiting thermal water, separately for fractured or intergranular aquifers and mineral water and each curve represents an individual pumping test. In some cases, extended extrapolation was used in order to compare results at the same scale. In general, they all show a decrease of laminar losses with increasing pumping rate. At the onset of turbulent flow, the specific capacity (Q/s) decreases proportionally to the increase of pumping rate and, at the same time, the laminar losses are reduced. Analysis of step drawdown tests has shown that simplified interpretations and comparison between the wells is not straightforward, but requires a detail knowledge about the system. Each well reflects specific characteristics and conditions in which the test was performed. Therefore, even a small change of hydraulic boundary condition (e.g. activation of additional fractures, hydraulic barriers, ...) significantly affects the test performance. Hydraulic characterisation of carbonate aquifers with fissured porosity is due to specific conditions, which are determined by pronounced heterogeneity and anisotropy, much more complex than the characterisation of aquifers with intergranular porosity. The dual porosity conceptualization based on the hydraulic exchange between different fractures dimensions is significantly affecting the well performance, resulting in significantly variable Q/s ratio at each step.

The theoretical laminar losses were compared with maximum allowed production rates as determined in concession decrees (Table 1). Wells 9 and 20 suggest negative linear head loss coefficient (B) and therefore cannot be evaluated by calculating laminar losses. Detailed interpretation of calculated B values were not taken into account, since it was impossible to separate the linear well losses and aquifer losses. The negative B value which was calculated in two wells is most likely related to »breakthrough« pressure, which means that a certain pressure difference must be reached to develop a depression cone. Moreover it can also be assumed that negative B value indicate significant permeability reduction at the wellbore (e.g. compaction of the material during drilling, clogging from drilling mud,...). It is also assumed that the negative B values is related to significant time dependant aquifer characteristics. Those are especially important in fractured aquifers where the heterogeneous fractured media determines the hydraulic boundary conditions.

Laminar losses (L_p) in table 2 were calculated for maximum production rate as determined in concession decree (Q_{\max} CD). In case of 14 wells, the laminar losses are higher than 50 %, which means that linear head losses (aquifer and well) are still more important than nonlinear well losses. The detailed results are presented in Table 1. Based on step-drawdown test results it was possible to evaluate either a maximum production rate (Q_{\max}) should change (increase, decrease) or stay equal prior to Q_{\max} CD. From the total of 25 wells for which it was possible to calculate laminar losses, 11 can be addressed with good well performance. In all this wells, except one, the Q_{\max} CD can be increased and decree corrected. This is because the well losses represent a relatively small portion in the measured drawdown even after years of thermal water production. Medium well performance was identified in case of 7 wells. Also, in these wells, except one, the Q_{\max} CD can be increased and decree corrected. Five of those wells are producing mineral water with relatively low production rate. Therefore, the increased maximum production rate will not affect the aquifer capacity as allowed annual production quantity will not be changed in decrees. The other two wells are drilled in fractured aquifer where calculation of laminar losses can be uncertain. In 7 wells where their performance was evaluated as poor, the Q_{\max} CD not improved but on the contrary, in 3 wells the Q_{\max} CD should be decrease.



*Black points represent tested pumping rates.

Fig. 5. Laminar losses (L_p) in investigated wells according to water and aquifer type (a. thermal water – intergranular aquifer, b. thermal water – fractured aquifer and c. mineral water – intergranular aquifer).

Sl. 5. Laminarne izgube v preiskovanih vodnjakih glede na tip vode in vodonosnika (a. termalna voda – medzrnski vodonosnik, b. termalna voda – razpoklinski vodonosnik in c. mineralna voda – medzrnski vodonosnik).

Table 3. Results of step-drawdown test analysis for 30 thermal and mineral water wells in Slovenia.
 Tabela 3. Rezultati črpalnih preizkusov v korakih za 30 testiranih termalnih vrtnin in vrtnin z mineralno vodo v Sloveniji.

Well number	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	t_1	t_2	t_3	t_4	s_1	s_2	s_3	s_4	C	B	$Q_{max,CD}$	Q_{max}	Lp
	l/s				min				m				$m \cdot s^2/l^2$	$m \cdot s/l$	l/s		%
1	3.6	3.8	4.1	/	109	115	116	/	24.8	29.1	33.0	/	1.609	1.388	7	4.0	11.0
2	10.6	12.5	15.3	17.8	96	95	95	91.0	22.0	20.5	25.3	30.9	0.018	1.405	12	21.0	86.8
3	4.8	10.3	13.1	17.9	118	130	110	140.0	3.8	9.5	14.5	21.1	0.032	0.635	4.5	19.0	81.7
4	3.5	5.4	7.4	9.1	125	130	105	125.0	3.8	6.6	12.1	17.8	0.161	0.469	2	9.3	59.3
5	2.2	3.4	3.7	/	95	95	100	/	0.4	0.8	0.9	/	0.034	0.128	15	5.5	20.0
6	5.3	11.0	17.3	/	120	120	122	/	0.2	0.4	0.9	/	0.002	0.015	15.8	17.3	30.3
7	4.5	8.5	9.5	/	134	138	138	/	0.3	0.6	0.6	/	0.001	0.053	7	9.5	85.0
8	12.2	16.7	27.9	/	202	204	202	/	4.4	6.4	12.3	/	0.005	0.299	15	28.0	80.0
9	4.4	7.0	10.3	/	130	134	202	/	0.7	2.3	4.4	/	0.045	-0.022	6.7	11.0	/
10	2.3	4.3	6.0	8.9	21	19	20	20.0	0.3	1.2	2.3	4.2	0.051	0.039	10	10.0	7.1
11	2.0	3.8	7.7	/	28	30	30	/	0.2	1.0	3.0	/	0.048	0.028	8	8.0	6.9
12	17.1	26.9	28.5	/	90	90	91	/	10.2	15.8	19.2	/	0.004	0.524	14.9	28.0	89.9
13	6.0	17.1	22.3	27.9	90	90	90	90.0	5.8	17.6	23.2	30.0	0.005	0.940	9.5	28.0	95.4
14	7.5	13.9	23.1	/	124	120	121	/	7.0	15.1	25.5	/	0.010	0.888	6	28.0	93.5
15	0.2	/	/	/	2901	/	/	/	133.0	/	/	/	/	/	0.79	0.4	/
16	2.8	5.0	7.2	10.5	125	120	120	120.0	0.5	1.4	3.0	4.7	0.038	0.081	11.1	11.1	15.9
17	4.2	6.9	10.4	/	120	120	120	/	2.0	4.0	7.0	/	0.031	0.355	28	28.0	29.0
18	4.5	6.3	7.3	/	120	120	120	/	5.0	7.0	3.0	/	/	/	11	/	/
19	8.0	9.3	10.0	/	30	30	30	/	1.0	1.3	1.5	/	0.010	0.046	8.5	8.5	29.3
20	2.2	3.6	6.0	/	17	23	24	/	0.4	1.3	5.0	/	0.180	-0.253	11.3	5.0	/
21	0.3	0.5	0.8	/	120	138	102	/	40.0	68.0	113.0	/	/	/	2	0.8	/
22	0.6	0.7	1.5	/	91	197	200	/	4.0	5.9	11.9	/	0.648	6.976	1.1	1.6	90.7
23	0.3	1.0	1.6	/	139	185	182	/	1.1	3.4	6.0	/	0.069	3.602	1.39	3.5	97.4
24	0.5	1.5	2.5	/	90	231	188	/	1.8	6.2	11.9	/	0.779	2.926	2.35	2.6	61.5
25	0.6	0.9	1.3	/	183	181	185	/	1.1	2.0	3.3	/	1.424	0.891	1	1.4	38.5
26	0.9	1.9	3.1	/	179	178	181	/	0.4	1.0	2.1	/	0.119	0.302	3	4.8	45.8
27	0.5	1.2	1.8	/	85	188	321	/	1.7	4.7	6.9	/	0.452	3.127	1.42	2.0	83.0
28	1.2	2.2	5.3	/	166	188	981	/	2.3	4.9	14.8	/	0.215	1.661	5	5.0	60.7
29	1.4	2.0	2.7	/	191	181	181	/	8.6	13.6	18.7	/	0.709	5.162	2.4	2.4	75.2
30	1.0	1.8	2.5	/	183	179	247	/	2.6	5.5	8.9	/	1.609	1.388	2.36	2.5	49.8

Conclusion

In the present study, an attempt has been made to evaluate and compare the well performance using Jacob empirical method for calculation of well losses and aquifer losses. This parameter was recognized as very useful in order to quantify technical characteristics of production mineral and thermal water wells also referred to well efficiency. On the contrary, well loss coefficient magnitude was recognized as a very inappropriate indicator whether the well is properly designed or effectively developed. The presented approximate method of step-drawdown test interpretation calculates only the nonlinear component of well loss, while the linear component, which is generated due to partial penetration, skin effect or hydrogeological boundary effect, is included within the linear head loss.

Most of the tests (23 of 30) were carried out in three steps, averaging up to 1.5 hour for each. The drawdown stabilization during pumping was reached in approximately 70 % of wells. The main problems for the successful implementation were: insufficient observation equipment, a non-optimal system for regulating the pumping discharge rate, rare observation wells and a constant need for water production. The latter prevented either the establishment of constant pumping rate or complete suspension of production for several hours. There are many potential improvements in test implementation, but they are to a certain extent related to investments in the technology system for the use and control of the use of groundwater by the concessionaires.

Although a lot of investigated wells are a few decades old, surprisingly the calculated laminar losses were higher than 70 % in 44 % of these. Moreover, the analysis showed that for a large number of wells (at least 7), their performance is relatively poor, which means that the nonlinear losses in the well are significantly higher than the linear losses in the aquifer. It is expected that such situation may be attributed to the inappropriate technical condition of the well in some places (e.g. well deterioration). A special consideration was given to 28 % of wells where the calculated laminar losses were between 30 and 70 %. In such cases it is very difficult to obtain an appropriate conclusion, since in most cases a technically appropriate step drawdown test was performed for the first time. Therefore, it was impossible to compare the acquired data with previous tests and consequently, impossible to evaluate time-dependant changes in well performance.

The results indicate possible changes in the technical condition of some wells. However this will be verified only when at least two comparable step-drawdown tests will be performed in each well. In order to timely implement measures for preventing further deterioration, it is necessary to constantly monitor the well performance. Further investigation will include also constant-rate pumping test in order to determine hydraulic properties of the aquifer along with the consideration of the total well losses and consequently the significance of the linear well loss component.

Acknowledgment

This paper was prepared under the PhD Grant 1000-19-0215 at the Geological Survey of Slovenia, financed by the Slovenian Research Agency (ARRS) through research program P1-0020 Groundwater and Geochemistry in the frame of the Young Researchers programme. Part of the research was conducted under the activities financed by the Environmental Agency of Slovenia by grant agreement No. 2551-18-700022.

Nomenclature

Symbol	Parameter	Unit
s	Drawdown	m
$s_{1,2,3,4}$	Drawdown for each step respectively	m
s_w	Well loss drawdown	m
$s(t)$	Measured drawdown	m
$s(r_w, t)$	Drawdown with no well loss	m
t	Time	min
$t_{1,2,3,4}$	Duration of each step respectively	min
r_w	Well radius	m
T	Transmissivity	m ² /s
Q	Discharge (pumping rate)	l/s
$Q_{1,2,3,4}$	Pumping rate for each step respectively	l/s
$W(u)$	Theis well function	/
S	Storage coefficient	/
B_1	Linear aquifer loss coefficient	m·s/l
B_2	Linear well loss coefficient	m·s/l
P	Exponent of the well discharge	/
B	Aquifer circulation loss coefficient	m·s/l
C	Non-linear well loss coefficient	m·s ² /l ²
E_w	well efficiency	%
L_p	Laminar losses	%
Q_{max}^{CD}	Maximum production rate determined in concession decree	l/s
Q_{max}	Maximum production rate suggested by step-drawdown test	l/s

Literature

- Abdalla, F. & Moubark, K. 2018: Assessment of well performance criteria and aquifer characteristics using step-drawdown tests and hydrogeochemical data, west of Qena area, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 138: 336–347. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.11.023>
- Bierschenk, W.H. 1963: Determining well efficiency by multiple step-drawdown tests. *Int. Assoc. Sci. Hydrol.*, 64: 493–507.
- Birsoy, Y. K. & Summers, W. K. 1980: Determination of aquifer parameters from step tests and intermittent pumping data. *Groundwater*, 18/2: 137–146.
- Davis, J.C. 2002: *Statistics and data analysis in geology*, 3rd e. John Wiley & Sons (New York): 656 p.
- Driscoll, F.G. 1986: *Groundwater and Wells*. Johnson Division, Saint Paul: 1089 p.
- Gundogdu, K.S. & Guney, I. J. 2007: Spatial analyses of groundwater levels using universal kriging. *Earth System Science*, 116/1: 49–55. <https://doi.org/10.1007/s12040-007-0006-6>
- Gumus, K. & Sen, A. 2013: Comparison of spatial interpolation methods and multi-layer neural networks for different point distributions on a digital elevation model. *Geodetski vestnik*, 57/3: 523–543.
- Gupta, A.D. 1989: On Analysis of Step-Drawdown Data. *Groundwater*, 27: 874–881.
- Hantush, M.S. 1964: Hydraulics of wells. In: V.T. Chow (eds.): *Advances in hydroscience*. Academic Press (New York and London), I: 281–432.
- Helwag, O.J. 1994: A General Solution to the Step drawdown Test. *Ground Water*, 32/3: 363–366. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1994.tb00652.x>
- Jacob, C.E. 1947: Drawdown test to determine effective radius of artesian well. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, 112: 1047–1064.
- Jacob, C.E. 1950: *Flow of Groundwater in Engineering Hydraulic*. John Wiley & Sons (New York): 321–386.
- Kasenow, M. 2010: *Applied ground-water hydrology and well hydraulics* 3rd edition. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colo.: 820 p.
- Kawecki, M. 1995: Meaningful interpretation of step-drawdown tests. *Ground Water*, 33/1: 23–32.
- Kralj, P., Rychagov, S. & Kralj, P. 2009: Changes in geothermal reservoir induced by exploitation: casestudies from North-East Slovenia and South Kamchatka. In: Šajin, R. et al. (eds.): *Proceedings of the Applied Environmental Geochemistry – Anthropogenic impact on the human environment in the SE Europe*. Geological survey of Slovenia, Ljubljana: 71–76.
- Kruseman, G.P. & De Ridder, N.A. 1990: *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen: 377 p.
- Lapanje, A. 2006: Izvor in kemijska sestava termalnih in termomineralnih vod v Sloveniji = Origin and chemical composition of thermal and thermomineral waters (in Slovenian). *Geologija*, 49/2: 347–370. <https://doi.org/10.5474/geologija.2006.025>
- Lapanje, A. & Rman, N. 2009: Thermal and thermomineral water. In: Pleničar, M., Ogorelec, B. & Novak, M. (eds.): *The geology of Slovenia*. Geological Survey of Slovenia, Ljubljana: 553–560.
- Lennox, D.H. 1966: Analysis of step-drawdown test. *J. Hydr. Div., Proc. of the Amer. Soc. Civil Engrs.*, 92(HY6): 25–48.
- Louwyck, A., Vandenboheden, A. & Lebbe, L. 2009: Numerical analysis of step-drawdown tests: Parameter identification and uncertainty. *Journal of Hydrology*, 380/1–2: 165–179. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.10.034>
- Mogg, J.L. 1969: Step-drawdown tests need critical review. *Groundwater J.*, 7/1: 28–34.
- Official Gazette, Nos. 67/02, 2/04 – ZZdrI-A, 41/04 – ZVO-1, 57/08, 57/12, 100/13, 40/14, and 62/20. Water Act. Internet: <http://pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO1244>
- Official Gazette, No. 125/04. Decree on the concession for the abstraction of thermal water from Ce-2/95 water source for bathing sites and heating of tourist premises. Internet: <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED3556>
- Official Gazette RS, Nos. 50/04, 75/05 and 45/08 – ZKme-1). Rules on natural mineral water, spring water and table water. Internet: <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=PRAV5392>
- Official Gazette RS, Nos. 103/15 and 14/18. Decree on the concession for the use of thermal water from the Mt-1/60, Mt-4/74, Mt-5/82, Mt-6/83 and Mt-7/93 boreholes for the needs of Terme 3000 – Moravske Toplice heating and swimming pools. Internet: <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED7061>
- Rman, N. 2014: Analysis of long-term thermal water abstraction and its impact on

- low-temperature intergranular geothermal aquifers in the Mura-Zala basin, NE Slovenia. *Geothermics*, 51: 214–227. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.01.011>
- Rman, N., Bălan, L., Bobovečki, I., Gál, N., Jolović, B., Lapanje, A., Marković, T., Milenić, D., Skopljak, F., Rotár-Szalkai, Á., Samardžić, N., Szócs, T., Šolaja, D., Toholj, N., Vijdea, A.M. & Vranješ, A. 2019: Geothermal sources and utilization practice in six countries along the southern part of the Pannonian basin. *Environmental Earth Sciences*, 79/1. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8746-6>
- Rman, N., Gál, N., Marcin, D., Weibold, J., Schubert, G., Lapanje, A., Rajver, D., Benková, K. & Nádor, A. 2015: Potentials of transboundary thermal water resources in the western part of the Pannonian basin. *Geothermics*, 55: 88–98. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.01.013>
- Rman, N. & Lapanje, A. 2018: V zadnjem desetletju izreden padec števila novih vrtin na južnem delu Panonskega bazena. *Embalaza, okolje, logistika – EOL*, 132: 34–36.
- Rman, N., Lapanje, A. & Prestor, J. 2011: Water concession principles for geothermal aquifers in the Mura-Zala Basin, NE Slovenia. *Water Resour Manag* 25: 3277–3299. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9855-5>
- Rman, N., Lapanje, A. & Rajver, D. 2012: Analiza uporabe termalne vode v severovzhodni Sloveniji = Analysis of thermal water utilization in the northeastern Slovenia (in Slovenian). *Geologija*, 55/2: 225–242. <https://doi.org/10.5474/geologija.2012.014>
- Rman, N., Šram, D. & Adrinek, S. 2017: Hidrogeološki matematični model toka podzemne vode in prenosa toplote v globokem geotermalnem telesu podzemne vode severovzhodne Slovenije, Novelacija modela v letu 2017. *GeoZS*, Ljubljana.
- Rorabaugh, M.I. 1953: Graphical and theoretical analysis of step-drawdown test of artesian wells. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, 79 (separate 362), 1–23.
- Sun, Y., Kang, S., Li, F. & Zhang, L. 2009: Comparison of interpolation methods for depth to groundwater and its temporal and spatial variations in the Minqin oasis of northwest China. *Environmental Modelling and Software*, 24/10: 1163–1170. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.03.009>
- Sheahan, N.T. 1971: Type Curve Solution of Step Drawdown Test. *Groundwater*, 9: 25–99.
- Szócs, T., Rman, N., Süveges, M., Palcsu, L., Tóth, G. & Lapanje, A. 2013: The application of isotope and chemical analyses in managing transboundary groundwater resources. *Applied Geochemistry - Special Issue*, 32: 95–107. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.10.006>
- Šram, D. 2011: Hidrogeologija visečih vodonosnikov na Ljubljanskem polju. Diplomsko delo. Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, Ljubljana: 80 p.
- Šram, D., Rman, N., Rižnar, I. & Lapanje, A. 2015: The three-dimensional regional geological model of the Mura-Zala Basin, northeastern Slovenia. *Geologija*, 58/2: 139–154. <https://doi.org/10.5474/geologija.2015.011>
- Yao, L., Huo, Z., Feng, S., Mao, X., Kang, S., Chen, J., Xu, J. & Steenhuis, T.S. 2013: Evaluation of spatial interpolation methods for groundwater level in an arid inland oasis, northwest China. *Environmental Earth Science*, 71: 1911–1924. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2595-5>
- Varouchakis, E. A. & Hristopulos, D. T. 2012: Comparison of stochastic and deterministic methods for mapping groundwater level spatial variability in sparsely monitored basins. *Environmental Monitoring Assess*, 185: 1–19. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2527-y>
- Walton, W.C. 1962: Selected analytical methods for well and aquifer evaluation. *Illinois State Water Survey Bulletin* 49, Urbana, Illinois: 81 p.
- Webster, R. & Oliver, M.A. 2007: *Geostatistics for Environmental Scientists*, 2nd Edition. UK, England: 330 pp.
- Williams, D. E. 1985: Modern Techniques in Well Design. *Journal - American Water Works Association*, 77/9: 68–74.
- Theis, C.V. 1935: The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of the discharge of the well using groundwater storage. *Transactions of the American Geophysical Union*, 16: 519–524.
- Todd, D. K. & Mays, L. W. 2005: *Groundwater hidrology*. Hoboken (Nueva Jersey, Estados Unidos): John Wiley & Sons (New York).
- Ziary, Y. & Safari, H. 2007: To Compare Two Interpolation Methods: IDW, Kriging for providing properties (Area) Surface Interpolation Map Land Price, District 5, Municipality of Teheran area 1. *FIG Working Week 2007*. Hong Kong, China, pp. 13.



Late Quaternary evolution of the sedimentary environment in Modrejce near Most na Soči (Soča Valley, Julian Alps)

Poznokvartarni razvoj sedimentacijskega okolja v Modrejcah pri Mostu na Soči (Posočje, Julijske Alpe)

Petra JAMŠEK RUPNIK¹, Manja ŽEBRE^{1,2} & Giovanni MONEGATO³

¹Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ul. 14, SI-1000 Ljubljana, Slovenia; e-mail: petra.jamsek-rupnik@geo-zs.si

²Aberystwyth University, Department of Geography and Earth Sciences, Llandinam Bldg, Penglais, Aberystwyth SY23 3DB, United Kingdom

³Italian National Research Council CNR, Institute of Geosciences and Earth Resources IGG, Via G. Gradenigo 6, 35131 Padova, Italy

Prejeto / Received 19. 5. 2020; Sprejeto / Accepted 13. 11. 2020; Objavljeno na spletu / Published online 7. 12. 2020

Key words: glaciation, glaciofluvial deposition, glaciolacustrine deposits, till, Soča Glacier, Quaternary, Soča Valley

Ključne besede: poledenitev, glaciofluvialna sedimentacija, glaciolakustrični sedimenti, til, Soški ledenik, kvartar, Posočje

Abstract

Geomorphological and geological mapping have long been used to study the glacial history of the Slovenian Alps, but many uncertainties remain regarding the time and extent of Pleistocene glaciations there. Glacial landforms and undisturbed glacial deposits are rare in the areas of the former glacier terminus, especially in the Soča Valley, where large discrepancies in the interpretation of the extent of the former Soča Glacier have been reported. Early studies proved inconclusive as to whether one or two glaciations extended into the Soča Valley as far as Most na Soči. In order to answer this question, the Quaternary sedimentary succession and landforms in the Modrejce Valley near Most na Soči were investigated. New geological and geomorphological field data allow the interpretation of the sedimentary environment and the stratigraphic relationships between different units. In response to glacial dynamics, the sedimentation developed from glaciofluvial and glaciolacustrine to fully glacial environments, followed by slope deposition. At higher altitudes lateral moraines are preserved, while the staircase-like slope below has been carved into older glacial, glaciofluvial and glaciolacustrine deposits by glacial and post-glacial processes, including fluvial erosion and slope dynamics. We conclude that the succession studied here was deposited over the course of two different glacial advances – LGM and pre-LGM. Our study thus suggests that the Soča Glacier extended as far as the area of Most na Soči twice over the course of the late Quaternary.

Izvleček

Geomorfološke in geološke raziskave zgodovine poledenitev v Slovenskem Alpskem prostoru imajo dolgo tradicijo, kljub temu pa še vedno ostaja več nejasnosti o obsegu in času pleistocenskih poledenitev v tem prostoru. Ledeniške geomorfne oblike in nepredelani ledeniški sedimenti so redko ohranjeni na območjih nekdanjih ledeniških čel, kar še posebej velja za Posočje, za katero so bile poročane različne interpretacije obsega nekdanjega Soškega ledenika. Pretekle študije niso uspele ugotoviti, ali je ena ali morda več poledenitev segalo tako daleč po Posočju, da je doseglo Most na Soči. Da bi raziskali to vprašanje, smo svojo študijo usmerili na kvartarno sedimentacijsko zaporedje in geomorfne oblike v Modrejcah pri Mostu na Soči. Novi terenski geološki in geomorfološki podatki omogočajo interpretacijo sedimentacijskega okolja in stratigrafskih odnosov med različnimi notami. V povezavi z ledeniško dinamiko se je sedimentacijsko okolje razvilo iz glaciofluvialnega in glaciolakustričnega v ledeniškega, kateremu je sledilo odlaganje pobočnega materiala. Bočne morene so ohranjene na višjih legah, medtem ko je stopničasto pobočje vrezano v starejše ledeniške, glaciofluvialne in glaciolakustrične sprijete sedimente. Vrezovanje je rezultat delovanja mlajših ledeniških procesov in procesov po umiku ledenika, kot so rečna erozija in pobočna dinamika. Sklepamo, da je bilo preučeno sedimentacijsko zaporedje odloženo med dvema različnima napredovalnima fazama; v zadnjem poledenitvenem višku in v enem izmed prejšnjih. Naša študija tako nakazuje, da je Soški ledenik v poznejšem delu kvartarja dvakrat segal do območja Mosta na Soči.

Introduction

The glacial history of the southeastern Alps covers multiple glaciations, which were first established by Penk & Brückner (1901–1909). Improvements in dating methods allowed for better characterization of the chronology of the last glacial cycle (Monegato & Ravazzi, 2018), especially for the Last Glacial Maximum (LGM), which is best preserved due to its young age (about 26–19 ka, e.g., Monegato et al., 2007; Ivy-Ochs et al., 2008; Ivy-Ochs, 2015; Monegato et al., 2017). In the Alps, deposits related to older glaciations are difficult to date (e.g., Dehnert et al., 2012; Lowick et al., 2015; Rades et al., 2016) and their relative chronologies are inferred through their stratigraphic relationship with the alluvial-coastal stratigraphy (Fontana et al., 2010) or through analysis of their boundaries, which are sometimes characterized by paleosoils or peat layers (Gianotti et al., 2015).

The Alps in Slovenia hosted three large valley glaciers – the Soča, Sava Dolinka and Sava Bohinjka glaciers – as well as small cirque and

valley glaciers in the Kamnik-Savinja Alps and the Karavanke Mountains (Bavec & Verbič, 2011) (Fig. 1). Small ice caps independent from the major Alpine valley glaciers were present in the Northern Dinaric sector (Žebre et al., 2013, 2016). Although the glacial history of the Slovenian territory has been studied since the late 19th century, many uncertainties remain about the timing and extent of Pleistocene glaciations in the Slovenian Alps (Bavec & Verbič, 2011; Ferik et al., 2017). This is especially true for the Soča mountain basin, where spatially incomplete records on landforms and lack of geochronological data still do not allow us to make any thorough reconstructions of former ice limits. In fact, earlier studies suggested that during the Würm (*sensu* Chaline & Jerz, 1984) the Soča Glacier extended southwards out of the Julian Alps down to Tolmin and even further, to Most na Soči (Brückner, 1891; Tellini, 1898; Penk & Brückner, 1901–1909; Feruglio, 1925; Winkler, 1931; Melik, 1954; Šifrer, 1965). On the other hand, more recent findings suggest that the Soča Glacier did not even reach

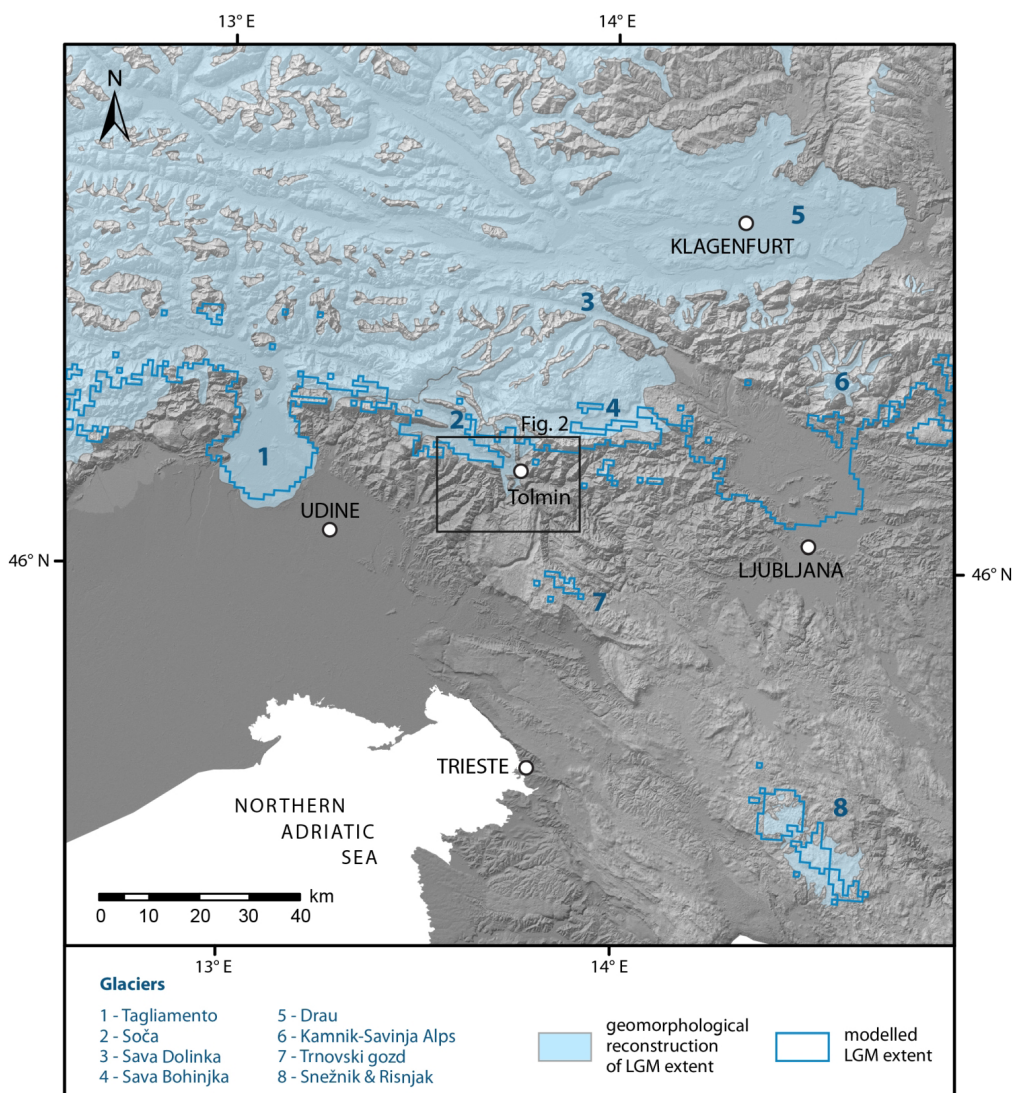


Fig. 1. LGM glacier extent in southeastern European Alps. The extent of the modelled LGM glacier driven by the EPICA paleo-temperature record and paleo-precipitation correction is after Seguinot et al. (2018), while the geomorphological reconstruction of the extent of the LGM glacier is modified from Ehlers et al. (2011). The digital terrain model is from SRTM data (Shuttle Radar Topography Mission), accessible from EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

beyond the Bovec Basin, which is located more than 30 km upstream from Most na Soči (Bavec et al., 2004). Such large discrepancies are the result of sparse landform records as well as the overprinting of glacial evidence by subsequent glacier re-advances and late- to post-glacial slope processes. Moreover, the most up-to-date model-based simulations of the LGM ice extent in the Eastern Alps, including the Slovenian Alps (Seguinot et al., 2018) (Fig. 1), are not in accordance with the roughly defined geomorphological ice limits, which makes interpretation of the extent of paleo-glaciers here even more questionable and in need of new data.

In the past, glacial and proglacial sediments in the Soča Valley were studied using geological and geomorphological methods to constrain the extent of the glacier and interpret its dynamics (Šifrer, 1964/1965; Kuščer et al., 1974; Kunaver, 1975, 1980; Bavec et al., 2004). Glacial deposits

from the last and penultimate glaciations were dated in the Bovec Basin (Bavec et al., 2004). Quaternary deposits in the Most na Soči area have been studied previously by Šifrer (1965) and more recently mapped by Buser (1987) as part of the basic 1:100.000 geological map. According to Šifrer (1965) the distribution of till and proglacial deposits suggests that the Soča Glacier was divided into two ice lobes south of Tolmin. Although glacial landforms and deposits in this area have been identified and described very precisely, it is unclear whether they were deposited over the course of one or several glaciations. Any reliable absolute dating that could reveal the age of glacial deposits around Most na Soči is still missing.

This study focuses on late Quaternary deposits in the Modrejsce Valley located between Tolmin and Most na Soči (Fig. 2), where steep cliffs provide good exposures for the study of stratigraphic relationships among the sedimentary units.

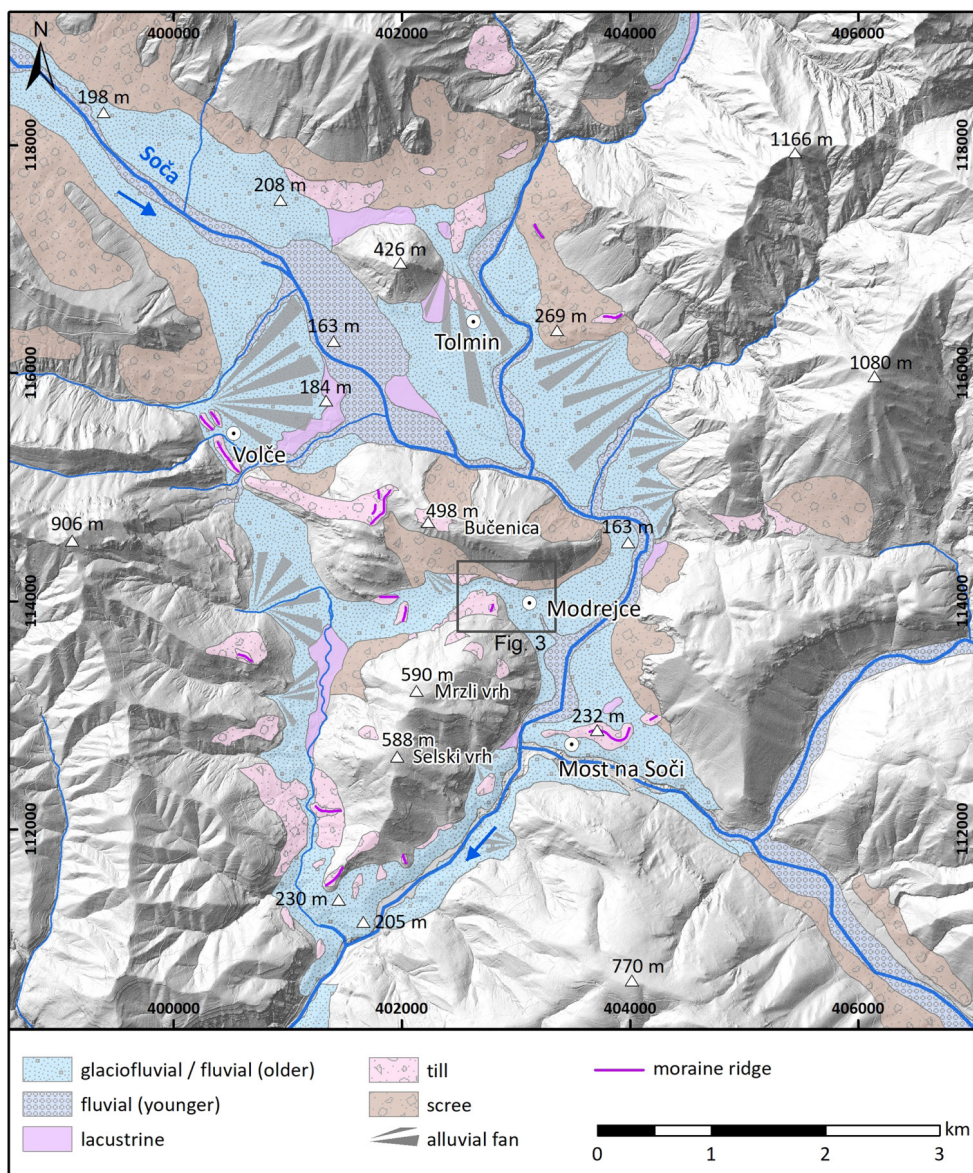


Fig. 2. Distribution of Quaternary deposits in the Tolmin and Most na Soči areas (updated after Šifrer, 1965 and Buser 1987). Shaded relief is derived from LiDAR based DEM (Ministry of the Environment and Spatial Planning, Slovenian Environment Agency, 2011).

Using geological and geomorphological mapping and sedimentological analysis we investigated the landforms and deposits, interpreted their sedimentary environments, and established their relative chronological relationships. This enabled us to reconstruct the late Quaternary sedimentary evolution of this area in relationship to glacial advances and slope dynamics.

Methods

Quaternary landforms and deposits in the Modreje Valley were studied using geomorphological and geological mapping, as well as sedimentological facies analysis. A map of Quaternary deposits in the wider Tolmin area (Fig. 2) was summarized from Šifrer (1965), Buser (1987) and our GIS- and field-based geomorphological and geological mapping. A detailed map of Quaternary landforms in the selected area of Modreje (Fig. 3A) was prepared by means of field-based geomorphological and geological mapping along with a stacked cross-section (Fig. 3B) and description of landforms (Figs. 4 and 5) and deposits (Fig. 6).

Geomorphological mapping was based on LiDAR data with a relative horizontal and vertical accuracy of 0.30 and 0.15 m, respectively (Ministry of the Environment and Spatial Planning, Slovenian Environment Agency, 2011). The LiDAR-based DEM with 1 m resolution was used to generate a shaded relief map, a slope degree map, a slope aspect map and contour lines with an equidistance of 1 m. These various topographic representations helped to distinguish different geomorphic characteristics associated with Quaternary sedimentation and erosion (e.g. terraces, cliffs, moraines, colluvial fans).

Quaternary deposits were documented using field sedimentological logging. Each unit was described according to its lithology using classifications by Wentworth (1922) and Folk et al. (1970) and according to its various sedimentary characteristics described by Tucker (2011). The lithology of the units is described based on macroscopic observations. The lithological composition of the clasts is given qualitatively. Facies are summarized according to Eyles et al. (1983) and Miall (2006) codes respectively for glacial and alluvial/deltaic deposits (Table 1) and into facies associations as in Miall (2006) and Benn and Evans (2010). This approach enabled us to gather the data necessary to interpret the depositional environment, its evolution and clast provenance.

Quaternary deposits in the Soča Valley around Tolmin and Most na Soči

The Soča Valley floor around Tolmin and Most na Soči is mainly covered with glaciofluvial, fluvial and alluvial fan deposits (Fig. 2). Two units of fluvial deposits were distinguished: the younger fluvial deposits represent the Holocene thalweg of the Soča River, and the older fluvial and glaciofluvial deposits are terraced. The terraces have risers that vary in size from several meters to more than 50 meters. In several places the terraces are covered by alluvial fans related to small tributaries of the Soča River. Based on relative elevation, landform preservation, sediment characteristics, pedogenesis and cementation, the terraces are assumed to be Middle to Late Pleistocene in age, while the alluvial fans are assumed to be Late Pleistocene (Šifrer, 1965).

Lacustrine and glacial sediments are also present in the valley, whereas scree deposits are

Table 1. Facies codes used in this study are summarized from Eyles et al. (1983) and Miall (2006).

Facies code	Facies	Sedimentary structures
Gcm	Clast-supported, massive gravel	/
Gmm	Matrix-supported, massive gravel	Weak grading
Gh	Clast-supported, crudely bedded gravel	Horizontal bedding, imbrication
Gp	Gravel, stratified	Planar cross-beds
Gt	Gravel, stratified	Trough cross-beds
Sm	Sand, fine to coarse	Massive, or faint lamination
Sh	Sand, very fine to coarse, may be pebbly	Horizontal lamination
Sr	Sand, very fine to coarse	Ripple cross-lamination
Fl	Sand, silt, mud	Fine lamination, very small ripples
Fsm	Silt, mud	Massive
Dmm	Matrix-supported, massive diamict	/
Dms	Matrix-supported, stratified diamict	Stratification more than 10 % of unit thickness
Dcm	Clast-supported, massive diamict	/
Dcs	Clast-supported, stratified diamict	Stratification more than 10 % of unit thickness
Dcg	Clast-supported, graded diamict	Vertical grading in clast content

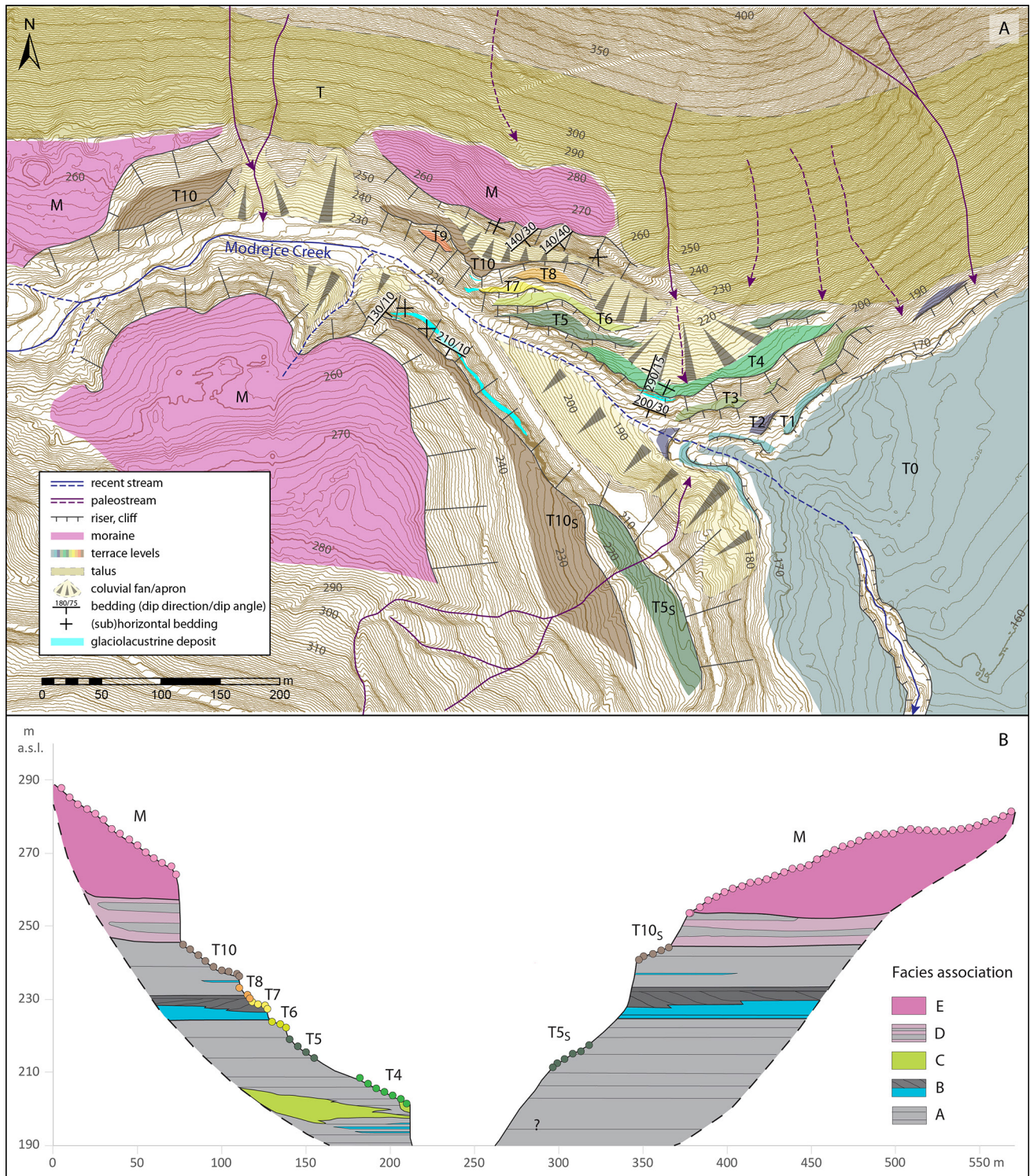


Fig. 3. Quaternary landforms and deposits of the Modreje Valley. A - Geomorphic map. B - Stacked cross-section of landforms and facies associations. Note that in order to capture all units, the topographic profiles of individual landforms were projected into stacked cross-sections from different parts of the map. The points at the surface are the actual projected vertices taken from the LiDAR DEM every 5 m across the terrace-like landforms. Topographic contours 1 m equidistant from each other are derived from LiDAR based DEM (Ministry of the Environment and Spatial Planning, Slovenian Environment Agency, 2011).

abundant on the toe of valley slopes. Lacustrine sediments are laminated and well-consolidated muds, silts to sands. Their stratigraphic relation to the glaciofluvial succession places their deposition into glaciation (Šifrer, 1965). Glacial deposits are spread on the saddle that closes the Modreje Valley to the west (Fig. 2) up to about

280 m a.s.l. and form morainic ridges, whose outcrops show loose glacial deposits. Here, a thin soil (about 10 cm) developed on them and the deposit lacks any considerable sign of weathering. The shape of these moraines indicates they are well preserved, and their minimal weathering is similar to that of the LGM glacial deposits in

the nearby area (Monegato et al., 2007; Žebre et al., 2013; Colucci et al., 2014), suggesting a comparable young age. Cemented and weathered glacial deposits are also present within the suc-

cession and at different elevations up to about 500 m a.s.l.; they were likely deposited in different phases of glacial advance during the LGM or earlier (Šifrer, 1965).

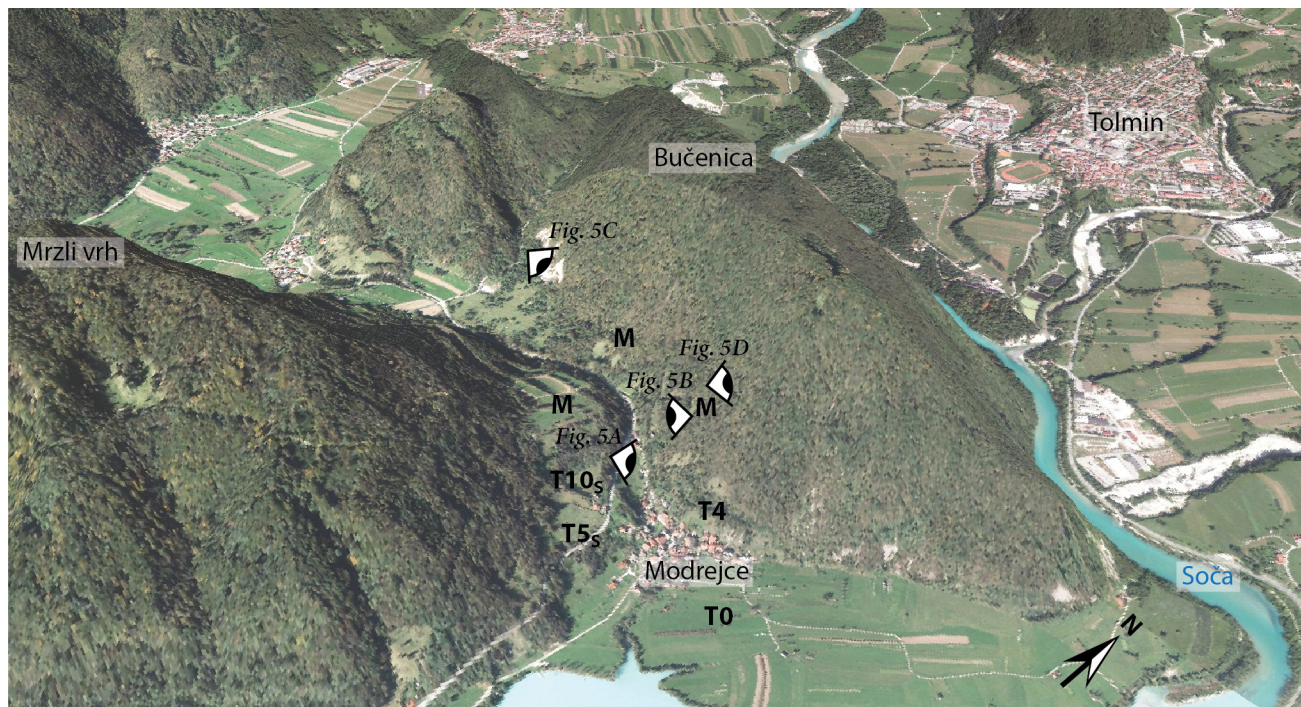


Fig. 4. Three-dimensional view of the Modrejce Valley with main landforms from the Fig. 3 (M – moraine, T4, T5s and T10s – terraces) and locations of the photos from Fig. 5. Digital orthophoto (Public Information of Slovenia, the Surveying and Mapping Authority of the Republic of Slovenia, DOF, 2011) is draped over LiDAR-based DEM (Ministry of the Environment and Spatial Planning, Slovenian Environment Agency, 2011).

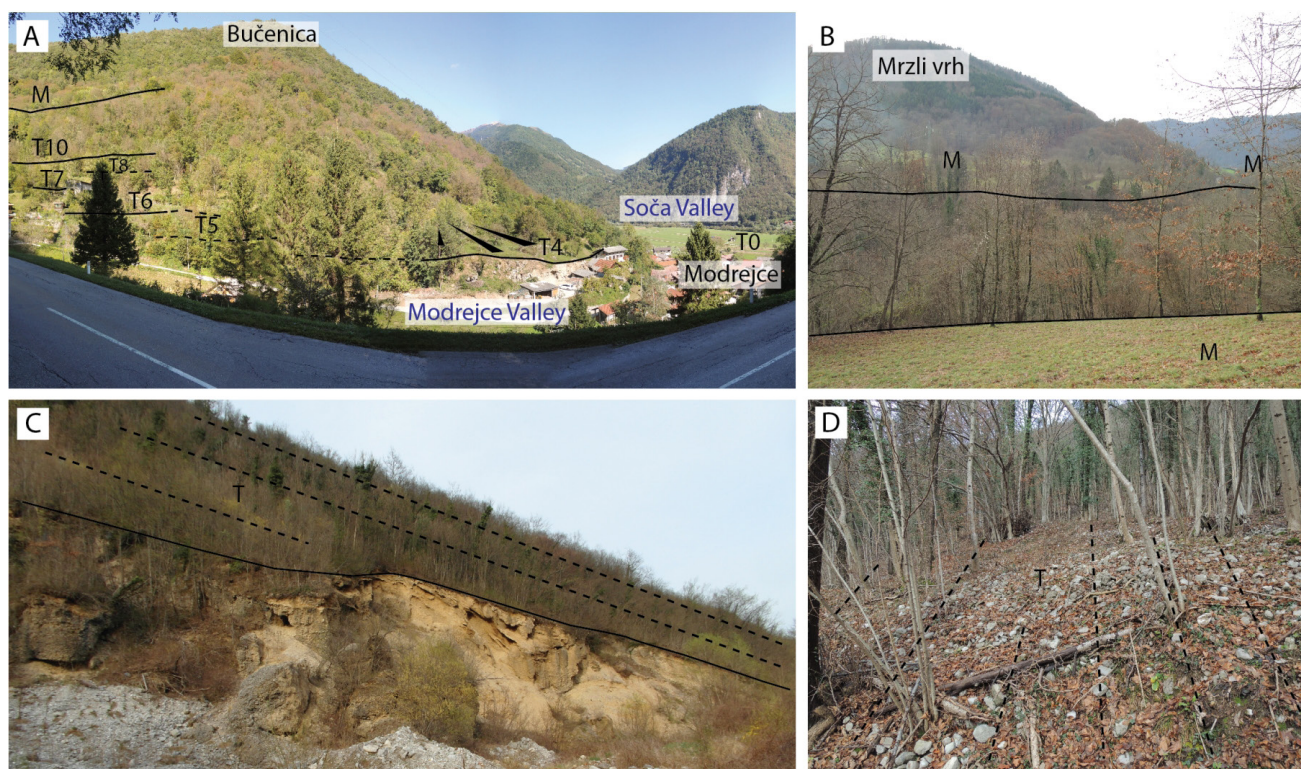


Fig. 5. Field photos of the Modrejce Valley landforms. A – Moraine, terraces and colluvial fan on the NE slopes of the valley. B – Moraines on both sides of the valley (photo taken from the NE side). C – Talus slope with corresponding scree deposits outcropping in a quarry on the NE slopes. D – Talus slopes above the moraine on the NE side. See Fig. 4 for locations of the photos.

Quaternary deposits and landforms of the Modrejsce Valley

The Modrejsce Valley is a tributary valley of the Soča Valley, running between the Bučenica and Mrzli vrh hills northwest of Most na Soči (Fig. 2). The Modrejsce Creek runs through the valley. The bedrock on the NE slopes consists of platy Volče limestone with chert (Upper Cretaceous; Coniacian – Campanian), which is separated by the dextral strike-slip Idrija Fault from the coarse-grained limestone breccia with intercalations of flysch (Upper Cretaceous; Maastrichtian) building the bedrock on the SW slopes (Buser, 1987). The valley hosts glacial sediments, as well as glaciofluvial and scree deposits (Šifrer, 1965).

Ten terrace-like surfaces separated by steps and cliffs were mapped on the hillslopes of the Modrejsce and Soča valleys between 170 and 250 m a.s.l. (Figs. 3 and 5A). These surfaces are tens of meters wide and are not flat like common terraces; they instead slope gradually (5–15°) towards the valley bottom, in contrast to the steep slope of the valley flanks. The related deposits are partially covered by colluvial fans and aprons. Moraines are present at higher elevations (250–280 m a.s.l.) and characterize the saddle closing the Modrejsce Valley to the west (Figs. 3 and 4). Talus is present at even higher elevations (Figs. 3A and 5C, D).

The cliffs expose a complex series of Quaternary clastic deposits of mostly sandy conglomerates to gravels (Gh, Gp, Gt, Gcm) intercalated with layers of sandstones, sands (Sm, Sh, Sr) and silts (Fl, Fsm) (Fig. 6A–I). Local clast-supported to matrix-supported coarse breccias (Dcs, Dcm, Dcg) are interbedded. Matrix-supported diamicton (Dmm, Dms) characterizes some thick layers. The prevailing lithology of the clasts is limestone, whereas other lithologies occur including chert, cherty limestone, red marly limestone (Scaglia Rossa Formation), sandstone with mica, green marl and dolostone. Layers are mostly sub-horizontal; in some outcrops the bedding gently dips SE, WNW or SWS. Cross-bedding dips W to SW, indicating the transport from E and NE.

The mapped deposits in the Modrejsce Valley can be divided into five facies associations (FA) (Fig. 3B) according to their lithologic properties and their stratigraphic relations.

The FA-A consists of horizontal- to cross-bedded sandy gravels (Gh, Gp) with beds of crudely bedded gravels (Gcm) (Fig. 6A–B). Clast-size ranges from fine grained pebble to cobble and even small boulders occur. Gravels are poorly sorted and clast-supported; they are mostly cemented but with some loose gravel layers. Clasts

are sub-angular to rounded, mostly sub-rounded clasts prevail, some layers of prevailing rounded or sub-angular clasts occur. Lenses of massive silt and sand (Fsm, Sm) are interbedded.

The FA-A can be associated with fluvial deposition. The sedimentary structure with horizontal- and cross-bedding is typical for braided river deposits (Miall, 2006); however, the variation in roundness between subangular and rounded clasts stands in contrast to the fluvial environment typical of the Soča River during a warm period. The Soča River flows along its valley for about 60 km before reaching the investigated location, and its Holocene gravels are well rounded. Cross bedding in outcrops below T10 and T4 indicates the sediments were mostly deposited from E, NE and SE, which points to the Soča Valley. Also, the lithological composition of clasts indicates paleo-Soča provenance. Local sedimentation by the Modrejsce Creek is therefore excluded. Based on the roundness of the clasts and the largely poorly sorting we interpret the FA-A as glaciofluvial, related to the outwash stream of the Soča Glacier close to the valley slope.

FA-B is represented by a coarsening upward succession from laminated or massive silt (Fl, Fsm) to cross-bedded conglomerates (Gp), outcropping on both sides of the Modrejsce Valley (Fig. 3B). Thick lenses of horizontal- and cross-laminated sands (Sh, Sr) and silts (Fl) with angular to sub-rounded dropstones up to 10 cm in size (Fig. 6D) occur below T4. Sand ripples (Sr) are visible in some parts of these layers. A succession consisting of horizontal-laminated silt to sand (Fl, Sh) up to 2 m thick crops out in the cliff below T10 on both sides of the Modrejsce Valley (Fig. 6E–G). There, silts and sands occasionally include sub-angular to rounded dropstones up to 2 cm in size. Laminas of sandstone with sand ripples (Sr) are locally present within loose sand. The succession shows reverse gradation from silts at the bottom to fine and coarse sands towards the top. Although not continuously exposed, the lateral extent of this succession can be followed in the southern cliff for some 150 m. The fine-grained succession is overlain with fine grained conglomerates (Gp, Gh), followed by coarser grained conglomerates (Gp, Gh), with angular to sub-rounded clasts. The cross-bedding dips about 30° to the SW (Fig. 6H).

The finer layers of laminated silt and sand with dropstones and sand ripples (FA-B) intercalated within the FA-A are interpreted as lacustrine tosets and bottomsets. Since they occur within the glaciofluvial succession and include dropstones

they are likely related to a glaciolacustrine environment. Moreover, the thicker succession of reverse grading silts and sands in the cliff below T10S followed first by cross-bedded sandy conglomerates dipping towards the SW and then horizontal- to cross-bedded sandy conglomerates likely indicate toeset to foreset transition in a Gilbert-type delta succession (e.g. Nemeč, 1990) at the margin of the glacier in a southwestward progradation during glacial advance.

FA-C consists of layers of sandy breccia (Dcs, Dcm) occasionally present as interbedded layers within sandy conglomerates of FA-A. The sandy breccia is poorly sorted and clast supported, with angular to sub-rounded clasts, where sub-angular clasts prevail (Fig. 6C). In one case, we found facies of boulder size breccia without matrix (Dcg), filling the depression in FA-A in a cliff below T4. This breccia is massive, clast-supported, cemented and normally graded (Fig. 6J). The



Fig. 6.

clasts are angular to rounded, while sub-angular clasts prevail. Clasts range in size from 10 cm to more than 1 m.

Layers of sandy breccia may be interpreted either as facies of glaciofluvial deposits or as slope deposit. In some cases, the dipping of layers towards S (towards the bottom of the valley) suggests deposition from the slopes. Facies of boulder-size breccia without matrix (Dcg) is peculiar in the system in view of the large size

of the clasts and the absence of matrix. Due to the normal grading and roundness of the clasts we assume these deposits were formed by slope redeposition. The slope material likely originated from older glacial or periglacial sediment higher on the slopes, since some clasts within this FA are sub-rounded. Therefore, short gravity slope material was likely mixing with glaciofluvial material.

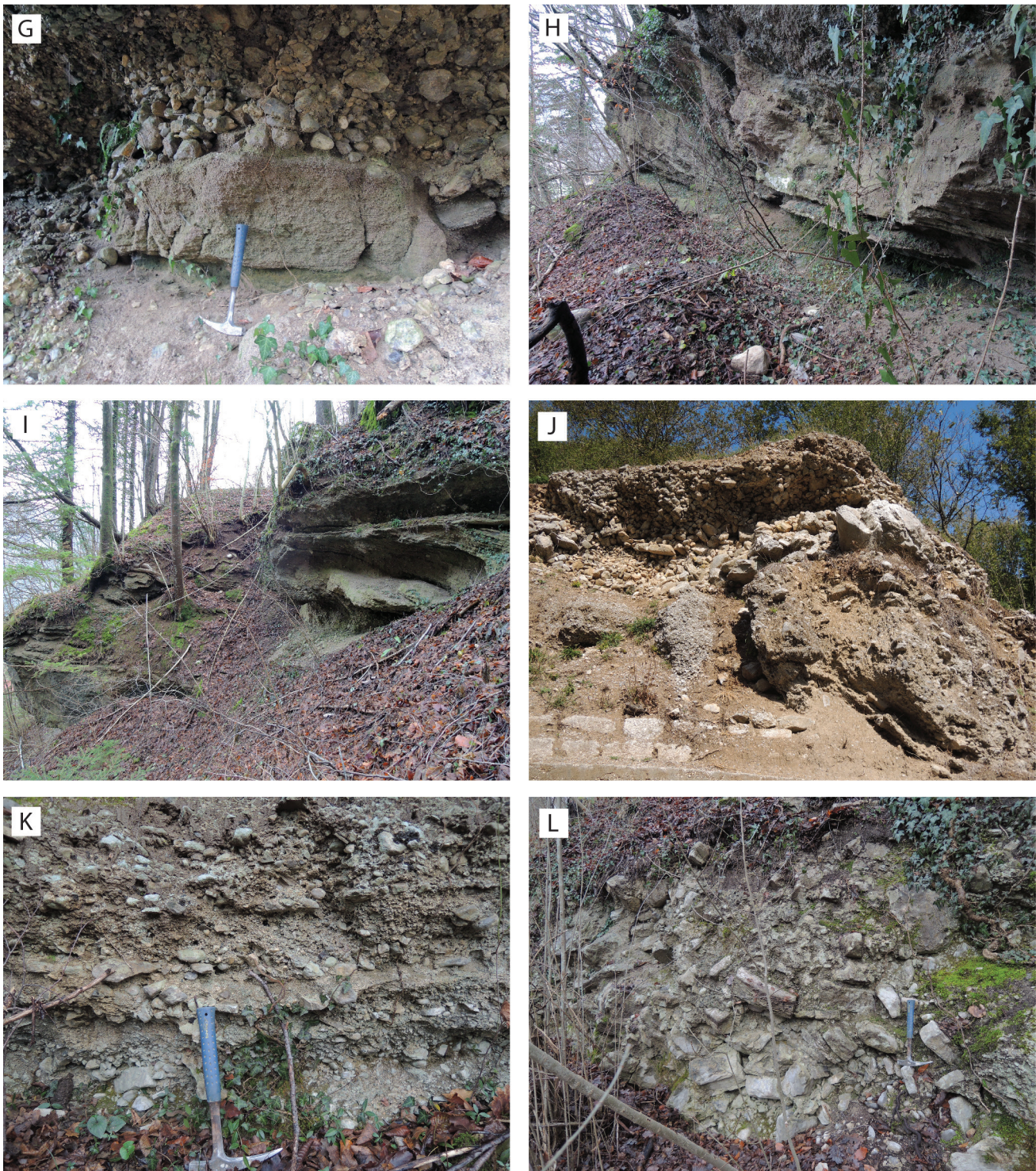


Fig. 6.

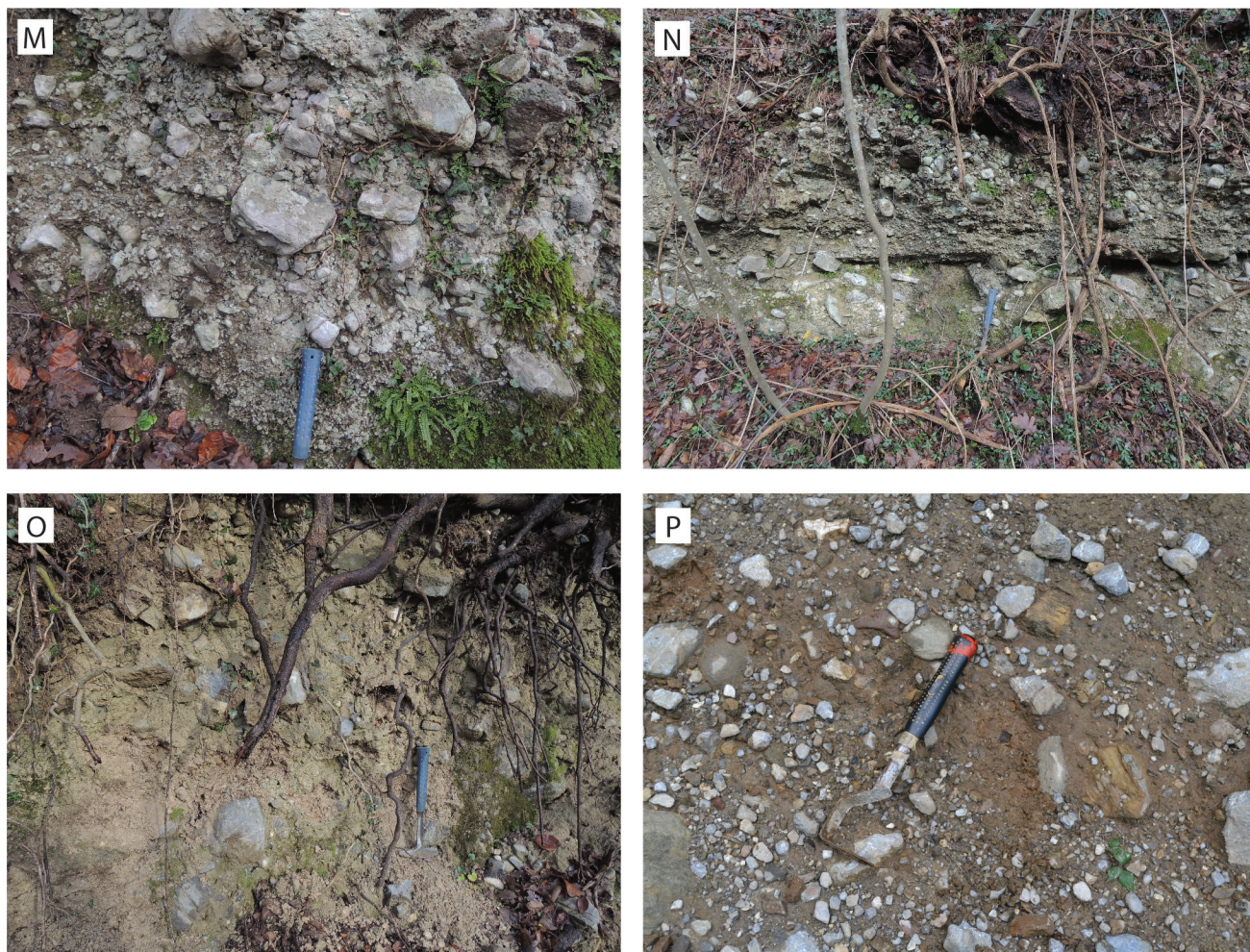


Fig. 6. Outcrops visible on the cliffs of the Modreje Valley (A-D and J: cliff below terrace T4; E-I: cliff below terrace T10S; K-O: cliff below moraine; P: top of moraine). A – Silt and sand (Fsm, Sm) interbedded with cemented sandy gravel (Gcm, Gh). B – Sandy conglomerate with cross-bedded structure (Gp). C – Sandy breccia (Dcm). D – Horizontally laminated silt to sand with dropstones (Fl, Sh). E – Horizontally laminated silt (Fl) to sand (Sh, Sr) overlaid with sandy conglomerate (Gcm). F – Sand with scattered pebbles (Sm). G – Laminated sandstone (Sh) overlaid with sandy conglomerate (Gh). H – Horizontally laminated sand (Sh) overlaid with cross-bedded sandy conglomerate (Gp). I – Vertical coarse grading of horizontal- and cross-bedded sandy conglomerate (Gh, Gp). J – Boulders without matrix filling the depression over sandy conglomerate (Deg). K – Horizontally-bedded coarse sandy gravels (Gh). L – Massive sandy breccia with chaotically oriented angular clasts (Dcm). M – Massive sandy conglomerate (Gcm). N – Contact between sandy breccia below (Dms) and sandy conglomerate (Gh) on top. O and P – Matrix supported, massive diamicton (Dmm).

FA-D is a complex association consisting of prevailing sandy breccia (Dcm, Dcs, Dmm, Dms) interbedded with sandy conglomerates (Gh, Gcm). Alternating stratified (prevailing; Dcs, Dms, Gh) and massive facies (Dmm, Dcm, Gmm, Gcm) occur and clast-supported (prevailing; Dcm, Dcs, Gcm, Gh) and matrix-supported facies (Dmm, Dms, Gmm) are present (Fig. 6K-N). Sandy breccia is poorly sorted, clast supported, with angular to rounded clasts, where angular to sub-angular clasts prevail. In parts, it consists of horizontally-bedded sandy breccia with fine-grained horizons (average clast size 2–8 mm, maximum 1 cm) and coarse-grained ones (average clast size 2 cm, maximum 15 cm) (Fig. 6K). In other parts, the sandy breccia is massive (Dcm), clast supported, with fine grained gravel and sand as a matrix and chaotically oriented angu-

lar clasts of up to 50 cm in size (Fig. 6L). Boulders more than 1 m occur locally within the breccia. Occasionally, the breccia is replaced by massive to stratified, poorly sorted and clast supported sandy conglomerates (Gh, Gcm), with angular to rounded clasts, with sub-rounded clasts prevailing (Fig. 6M). Interbedding between prevailing stratified and less often massive structure, clast- and matrix-supported structure, breccia and conglomerates, continues through this part of the Modreje succession. The prevailing lithology of the clasts is limestone, whereas marls and limestone with chert are also common, and other lesser lithologies include red marly limestone (Scaglia Rossa Formation), sandstone with mica, green marl and dolostone. Layers are mostly sub-horizontal, with occasional SE dipping layers also outcropping. The deposits of this FA

are cemented, and clasts, which are composed of clastic rocks partially weathered in otherwise not pedogenized deposits.

The mixing association FA-D crops out in the cliff below the moraines and indicates a continuous change in the depositional mechanism from glacial (massive, matrix-supported sandy breccia to conglomerate with chaotically oriented clasts) to glaciofluvial (stratified, clast supported, poorly sorted conglomerates), where the glaciofluvial may be related to the proglacial or subglacial streams.

FA-E consists of facies of massive and matrix-supported silty to sandy diamicton (Dmm) with boulders (Fig. 6O), with local lenses of massive sand (Sm) and gravels (Gmm). This diamicton has angular to rounded clasts, some of which are striated and polished. The deposit is normally- to over-consolidated towards the bottom. Clasts have not developed weathering rings, and deep weathering structures are absent, with only a thin layer of soil (roughly 10 cm) developed on these deposits.

The FA-E characterizes the uppermost deposits, which are interpreted as a glacial till and are morphologically represented by lateral moraines present at 250–280 m a.s.l. in the Modrejsce Valley; these belonged to the sedimentation by the two lobes of the Soča Glacier surrounding Mount Bučenica (Fig. 2).

Our interpretations of the depositional environments of FA-A, FA-B, FA-D and FA-E are consistent with earlier interpretations by Šifrer (1965). At several points in the Soča Valley, between Tolmin and Most na Soči, Šifrer also noted that certain terraces include sediments with different genesis and that these sediments do not correspond to the individual terrace as a landform, since the terrace landforms are cut into older sediments. Likewise, geomorphological evidence indicates that terrace-like surfaces T4–T10 in the Modrejsce Valley are not related to glaciofluvial deposits exposed in the cliffs. The studied glaciofluvial succession was deposited from the bottom of the valley upwards, regardless of the terrace levels, as suggested by a glaciolacustrine layer 2 m thick outcropping in the cliff below T10S on the southern side, and below T7 on the northern side of the valley. In contrast, fill terraces would each be composed of material of the same sedimentary facies origin and the uppermost terraces would include the older deposits. This suggests that the terrace-like surfaces T4–T10 in Modrejsce are likely erosional landforms.

Since glaciofluvial deposits were overrun by the glacier, terrace-like landforms were probably cut into glaciofluvial and glaciolacustrine deposits by subglacial erosion and mostly by subsequent post-glacial fluvial erosion, additionally reshaped by ongoing slope processes. Any sediments related to glacial and post-glacial fluvial erosion processes were not preserved in the exposed cliffs below terrace-like surfaces, except for the glacial deposits in the uppermost flat area (FA-E). However, they could be present on top of the terrace-like surfaces, but due to the lack of outcrops there, this cannot be verified without invasive research techniques. Furthermore, any sediments from this period would be buried near the slopes by the younger colluvial fans and aprons visible in the geomorphology (Fig. 3). Based on the geomorphological evidence alone, it could be speculated that post-glacial erosion may have created two paired and eight unpaired terrace-like surfaces. Their relationships are not clear due to the complex depositional and erosional history of the valley. The erosional processes were likely partly impacted by the lithological changes between glaciolacustrine and glaciofluvial deposits, promoting steep slopes in coarse-grained cemented units.

The lowermost terraces T0–T3 were not subjected to detailed sediment mapping. Based on spatial distribution, T1–T3 landforms are more likely fluvial terraces. T0 is one of a few broader Soča terraces (Šifrer, 1965).

Evolution of Quaternary sedimentary environment in the Modrejsce Valley

The stratigraphic architecture of the Modrejsce Valley deposits suggests that several phases of deposition and erosion occurred during the late Quaternary. The glaciofluvial environment (FA-A) related to the Soča Glacier was occasionally mixing with short-period (glacio)lacustrine (FA-B) and the slope deposition environment (FA-C). Towards the top of this succession, the glaciolacustrine delta deposits (FA-B) indicate the close proximity of the glacier. The succession continues with the glacial deposition in exchange with the glaciofluvial one (FA-D). The overall succession was buried by glacial deposits (FA-E). The subsequent incision of the Modrejsce Valley was characterized by slope deposition, which continues to this day. The entire studied succession, except for the covering slope deposits, was therefore deposited during cold phases and recorded fluctuations in the glacier terminus position around Tolmin and Most na Soči. Phases of glacial advance and

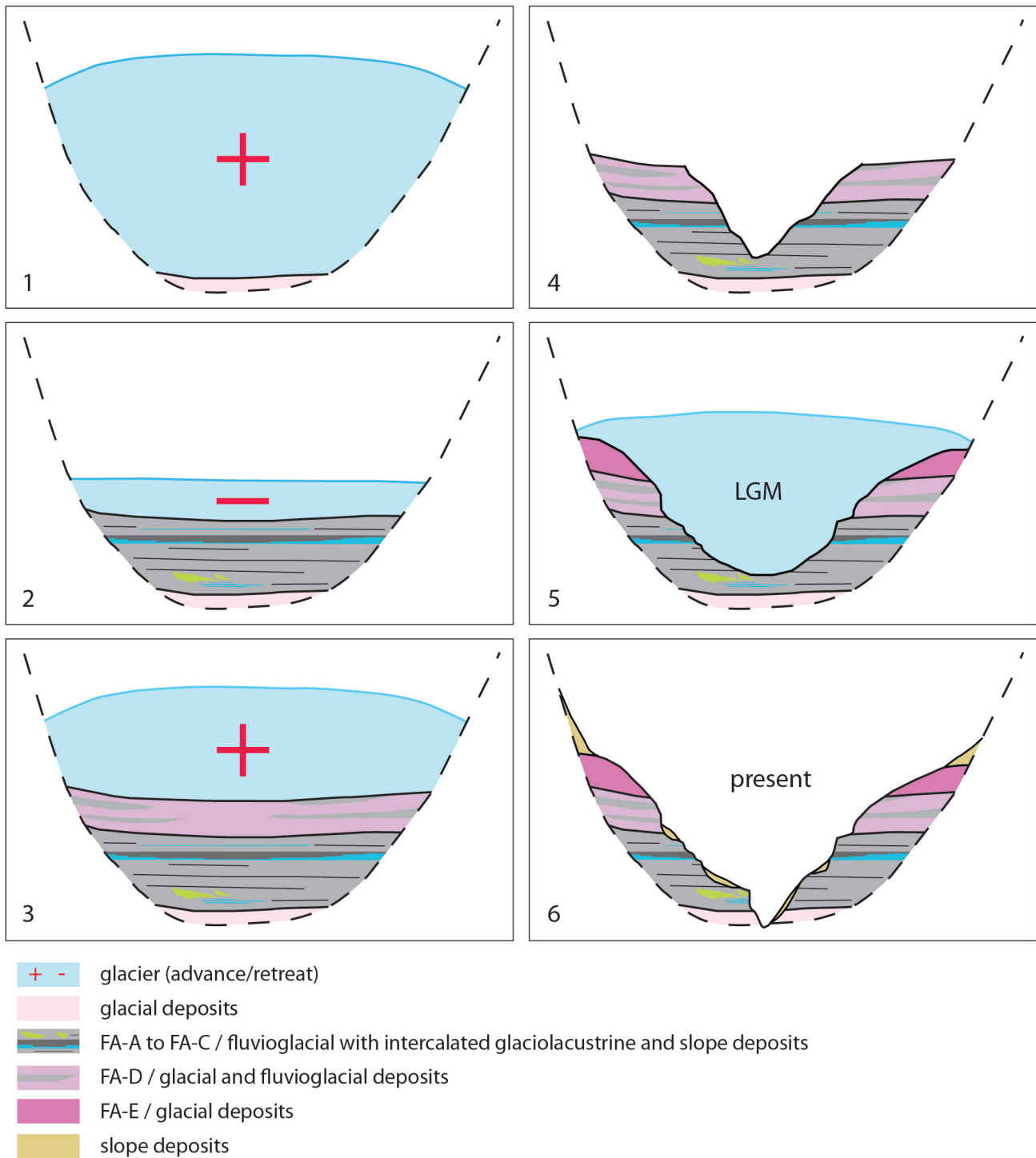


Fig. 7. Reconstruction of sedimentary phases showing the unique situation in the Modrejce Valley.

retreat were already proposed in this area by Širfer (1965), based on geomorphic and sedimentological records in the Soča Valley (Fig. 2).

The sedimentological and geomorphic records presented in this study show that the succession was likely deposited over the course of at least two different glacial phases (Fig. 7). In the later glacial phase, FA-E was deposited. Its degree of weathering (shallow soil, absence of deep weathering structures such as deep soil or cryoturbation and no weathering rings on clasts), the ab-

sence of cementation and the preservation of landforms (moraines present, with no erosion features developed on their surfaces) in the Modrejce saddle point to the LGM age. Similar type of landforms that have been clearly attributed to the LGM remain preserved in the south-eastern Alpine valleys (e.g., Pellegrini et al., 2005; Ravazzi et al., 2012; Colucci et al., 2014). One of the modeled extents of the LGM glaciation by Seguinot et al. (2018) also nearly reached Tolmin and is thus roughly in agreement with our estimation. In an

earlier glacial phase, FA-A to FA-C were deposited during the glacier retreat phase and FA-D deposited during the following glacier advance into the Modrejsce Valley. In view of the overall cementation of FA-A to FA-D, the presence of partly weathered clasts of clastic rocks in otherwise not pedogenized glacial diamicton (Dmm) in FA-D and the absence of related landforms it is likely that deposition of these successions occurred before the LGM and that successions were subsequently covered by lodgment till deposits (e.g., Reitner and Draxler, 2002). The succession of FA-A to FA-D was then eroded during the subsequent interglacial/interstadial phase and carved by the Soča Glacier during the last glacial advance, when moraines (FA-E) were settled all along the flat areas of the Modrejsce Valley. During the Late Glacial, the succession was eroded again as a result of post-glacial processes; small flat surfaces were shaped into a staircase-like slope. During the Holocene, a final slope/scree deposition was established and continues to this day.

Similar slope developments as in Modrejsce Valley can be observed in post-glacial incisions in Alpine valleys (e.g. Ravazzi et al., 2012; Reitner et al., 2016). However, it is a rare case that older deposits have been preserved in such abundance after the interglacial / interstadial erosion phase and the subsequent glacial accumulation and erosion phase. The conservation capacity of older loose and poorly cemented sediments during glacial erosion is negligible, everywhere in similar environments in the Alpine region. The exceptional case in our study could be due to the sheltered position of Modrejsce Valley in the passage between the hills Bučnica and Mrzli vrh, which was located outside the two main erosion corridors of the Soča Glacier, which split and encased around Bučnica (Fig. 2). Our interpretation of the depositional records thus represents a new and original contribution to the understanding of glacial and post-glacial landscape development.

Our reconstruction implies that the last, as well as one of the earlier glaciations reached the Most na Soči area, as suggested by Šifrer (1964/1965) and even earlier studies (Brückner, 1891; Tellini, 1898; Penck & Brückner, 1901–1909; Feruglio, 1925; Winkler, 1931; Melik, 1954). Since our provisional age estimates are based on comparisons of qualitative data, further quantitative chronological indications are needed to better narrow and constrain the age of these glacial advances, which information would cast new light on the geomorphological evolution of the Most na Soči valley knot.

Conclusions

Our study of the Quaternary deposits in the Modrejsce Valley offers new insights into the extent of glaciation in the Slovenian Alps, especially in the Soča Valley. The Quaternary sedimentary environment in this area developed in response to glacial dynamics from glaciofluvial, glaciolacustrine and slope intercalation to glacial deposition. Depositional records of glaciofluvial, glaciolacustrine and glacial sedimentation in the Modrejsce Valley are related to the Soča Glacier and show that the glacier reached the Most na Soči area twice in the late Quaternary. The investigated succession was deposited over the course of two different glacial periods, which we interpreted as LGM and pre-LGM glaciation. The glacial and glaciofluvial deposits from the earlier phase are abundant, despite the subsequent glacial overflow in the LGM. This is probably due to the unique sheltered position of Modrejsce Valley, which was outside the main erosional path of the Soča Glacier. Such sites are of crucial importance for the study of alpine glacial history. Further work with absolute dating methods is necessary to narrow the age of these glacial advances.

Acknowledgements

The study was carried out as part of program P1-0011, Regional Geology, and as a preliminary study for project J1-2479, Past climate change and glaciation at the Alps-Dinarides junction, both funded by the Slovenian Research Agency (ARRS). This work forms the basis for the ongoing structural investigation of the area. We would like to thank Jernej Jež from the Geological Survey of Slovenia for his field assistance and constructive comments during the preparation of the manuscript. Two anonymous reviewers are acknowledged for their comments on the manuscript, which have contributed to the improvement of the manuscript.

References

- Bavec, M., Tulaczyk, S. M., Mahan, S. A. & Stock, G. M. 2004: Late Quaternary glaciation of the Upper Soča River Region (Southern Julian Alps, NW Slovenia). *Sedimentary geology*, 165, 3/4: 265–283. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2003.11.011>
- Bavec, M. & Verbič, T. 2011: Glacial history of Slovenia. In: Horne, D.J., Holmes, J.A., Rodriguez-Lazaro, J. & Viehberg, F.A. (eds.): *Developments in Quaternary*

- Science, 15: 385–392. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53447-7.00029-5>
- Benn, D. I. & Evans, D. J. A. 2010: *Glaciers and Glaciations*. Routledge, London: 802 p.
- Buser, S. 1987: Osnovna geološka karta SFRJ, list Tolmin in Videm, 1:100.000. Zvezni geološki zavod, Beograd.
- Brückner, E. 1891: Eiszeit-Studien in den südöstlichen Alpen. *Jahrsbericht der Geographischer Gesellschaft von Bern*, 10: 156–164.
- Chaline, J. & Jerz, H. 1984: Arbeitsergebnisse der Subkommission für Europäische Quartärstratigraphie. *Stratotypen des Würm-Glazials. Eiszeitalter und Gegenwart*, 35: 185–206.
- Colucci, R.R., Monegato, G. & Žebre, M. 2014: Glacial and proglacial deposits of the Resia Valley (NE Italy): new insights on the onset and decay of the last alpine glacial maximum in the Julian Alps. *Alpine Mediter. Quat.*, 27/2: 85–104.
- Dehnert, A., Lowick, S. E., Preusser, F., Anselmetti, F. S., Drescher-Schneider, R., Graf, H. R., Heller, F., Horstmeyer, H., Kemna, H. A., Nowaczyk, N. R., Züger, A. & Furrer, H. 2012. Evolution of an overdeepened trough in the northern Alpine Foreland at Niederweningen, Switzerland. *Quaternary Science Reviews*, 34: 127–145. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.12.015>
- Ehlers, J., Gibbard, P. L. & Hughes, P. D. (eds.). 2011: Supplementary data to Quaternary glaciations – extent and chronology, a closer look. *Dev. Quaternary Sci.*, 15. Elsevier, Amsterdam. Internet: <https://booksite.elsevier.com/9780444534477> (last access: 10 February 2016).
- Eyles, N., Eyles, C.H. & Miall, A.D. 1983: Lithofacies types and vertical profile models; an alternative approach to the description and environmental interpretation of glacial diamict and diamictite sequences. *Sedimentology*, 30: 393–410. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1983.tb00679.x>
- Ferk, M., Gabrovec, M., Komac, B., Zorn, M. & Stepišnik, U. 2017: Pleistocene glaciation in Mediterranean Slovenia. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.*, 433: 179–191. <https://doi.org/10.1144/SP433.2>
- Feruglio, E. 1925: Carta geologica delle Tre Venezie. Foglio 25 “Udine”. Ufficio Idrografico Regio 629 Magistrato Acque di Venezia.
- Folk, R. L., Andrews, P. B. & Lewis, D. W. 1970: Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 13/4: 937–968. <https://doi.org/10.1080/00288306.1970.10418211>
- Fontana, A., Mozzi, P. & Bondesan, A. 2010: Late Pleistocene evolution of the Venetian–Friulian Plain. *Rendiconti Lincei*, 21: 181–196. <https://doi.org/10.1007/s12210-010-0093-1>
- Gianotti, F., Forno, M.G., Ivy-Ochs, S., Monegato, G., Pini, R. & Ravazzi, C. 2015: Stratigraphy of the Ivrea morainic amphitheatre (NW Italy): an updated syn-thesis. *Alpine and Mediterranean Quaternary*, 28: 29–58.
- Ivy-Ochs, S. 2015: Glacier variations in the European Alps at the end of the last glaciation. *Cuad. Investig. Geográfica*, 41/2: 295–315. <https://doi.org/10.18172/cig.2750>
- Ivy-Ochs, S., Kerschner, H., Reuther, A., Preusser, F., Heine, K., Kubik, P.W., Maisch, M. & Schlüchter, C. 2008: Chronology of the last glacial cycle in the European Alps. *Journal of Quaternary Science*, 23: 559–573. <https://doi.org/10.1002/jqs.1202>
- Kunaver, J. 1975: On the geomorphological development of the Basin of Bovec during the Pleistocene epoch. *Geografski Vestnik*, 47: 11–39.
- Kunaver, J. 1980: Razvoj in sledovi zadnje stadialne poledenitve v Zgornjem Posočju (I). *Geografski Vestnik*, 52: 17–36.
- Kuščer, D., Grad, K., Nosan, A. & Ogorelec, B. 1974: Geology of the Soča Valley between Bovec and Kobarid. *Geologija*, 17: 425–476.
- Lowick, S.E., Buechi, M., Gaar, D., Graf, H.R. & Preusser, F. 2015: Luminescence dating of Middle Pleistocene proglacial deposits from northern Switzerland: methodological aspects and stratigraphical conclusions. *Boreas*, 44/3: 459–482. <https://doi.org/10.1111/bor.12114>
- Melik, A. 1954: *Slovenski aplski svet*. Slovenska matica, Ljubljana: 606 p.
- Miall, A.D. 2006: *The Geology of Fluvial Deposits. Sedimentary Facies, Basin Analysis, and Petroleum Geology*. 4th corrected printing. Springer-Verlag Berlin Heidelberg: 589 p.
- Monegato, G. & Ravazzi, C. 2018: The Late Pleistocene multifold glaciation in the Alps: updates and open questions. *Alpine and Mediterranean Quaternary*, 31: 225 – 229.
- Monegato, G., Ravazzi, C., Donegana, M., Pini, R., Calderoni, G. & Wick, L. 2007: Evidence of a two-fold glacial advance during the last glacial maximum in the Tagliamento end moraine system (eastern Alps). *Quat. Res.*, 68: 284–302. <https://doi.org/10.1016/j.jyqres.2007.07.002>

- Monegato, G., Scardia, G., Hajdas, I., Rizzini, F. & Piccin, A. 2017: The Alpine LGM in the boreal ice-sheets game. *Sci. Rep.*, 7, 2078. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-02148-7>
- Nemec, W. 1990: Aspects of sediment movement on steep delta slope. In: Colella, A. & Prior, D.B. (eds.): *Coarse-Grained Deltas*. Spec. Publ. Int. Ass. Sedim., 10: 29–73. <https://doi.org/10.1002/9781444303858.ch3>
- Pellegrini, G. B., Albanese, D., Bertoldi, R. & Surian, N. 2005: La deglaciazione alpina nel Vallone Bellunese, Alpi meridionali orientali. *Geogr. Fis. Din. Quat.*, 7: 271–280.
- Penck, A. & Brückner, E. 1901-1909: *Die Alpen in Eiszeitalter*, 1-3. Tauchnitz, Leipzig: 1199 p.
- Rades, E. F., Fiebig, M. & Lüthgens, C. 2016: Luminescence dating of the Rissian type section in southern Germany as a base for correlation. *Quaternary International*, 478: 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.07.055>
- Ravazzi, C., Badino, F., Marsetti, D., Patera, G. & Reimer, P.J. 2012: Glacial to paraglacial history and forest recovery in the Oglio glacier system (Italian Alps) between 26 and 15 kyr cal BP. *Quaternary Science Reviews*, 58: 146–161. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.10.017>
- Reitner, J. & Draxler, I. 2002: Die klimatisch-fazielle Entwicklung vor dem Würm-Maximum im Raum Kitzbühel - St. Johann - Hopfgarten (Nordtirol/Österreich). *Terra Nostra*, 6: 298–304.
- Reitner, J.M., Ivy-Ochs, S., Drescher-Schneider, R., Hajdas, I. & Linner, M. 2016: Reconsidering the current stratigraphy of the Alpine Lateglacial: implications of the sedimentary and morphological record of the Lienz area (Tyrol/Austria). *E&G Quaternary Sci. J.*, 65/2: 113–144. <https://doi.org/10.3285/eg.65.2.02>
- Seguinot, J., Ivy-Ochs, S., Jouvét, G., Huss, M., Funk, M. & Preusser, F. 2018: Modelling last glacial cycle ice dynamics in the Alps. *Cryosphere*, 12: 3265–3285. <https://doi.org/10.5194/tc-12-3265-2018>
- Šifrer, M. 1965: *Kvartarni razvoj doline Soče med Tolminom in Ročinjem*. Inštitut za geografijo, SAZU, Ljubljana: 50 p.
- Tellini, A. 1898: *Intorno alle tracce abbandonate da un ramo dell'antico ghiacciaio del Fiume Isonzo nell'alta valle del Fiume Natisone e sull'antica connessione tra il corso superiore dei due fiumi*. Tipografia Seitz, Udine.
- Tucker, M.E. 2011: *Sedimentary rocks in the field: A practical guide*, 4th edition. John Wiley & Sons, Chichester: 288 p.
- Wentworth, C. K. 1922: A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology*, 30/5: 377–392. <https://doi.org/10.1086/622910>
- Winkler, A. 1931: *Zur spät und postglazialen Geschichte des Isonzotales*. Zeitschrift für Gletscherkunde, 19. Leipzig.
- Žebre, M., Stepišnik, U. & Kodelja, B. 2013: Traces of Pleistocene glaciation on Trnovski gozd = Sledovi pleistocenske Poledenitve na Trnovskem gozdu. *Dela*, 39: 157–170. <https://doi.org/10.4312/dela.39.157-170>
- Žebre, M., Stepišnik, U., Colucci, R.R., Forte, E. & Monegato, G. 2016: Evolution of a karst polje influenced by glaciation: The Gomance piedmont polje (northern Dinaric Alps). *Geomorphology*, 257: 143–154. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.01.005>



Spodnjekredni heteromorfní amoniti (Ancyloceratina) z Leš pri Prevaljah (Severne Karavanke, SV Slovenija)

Lower Cretaceous heteromorph ammonites (Ancyloceratina) from Leše near Prevalje (North Karavanke Mts. NE Slovenia)

Matija KRIŽNAR¹, Andrej BRICMAN² & Ivan OCEPEK³

¹Prirodoslovni muzej Slovenije, Prešernova 20, SI-1000 Ljubljana, Slovenija; e-mail: mkriznar@pms-lj.si

²Podgorje 133, SI-2381 Podgorje pri Slovenj Gradcu, Slovenija; e-mail: abricman1@gmail.com

³Na Fari 20, SI-2391 Prevalje, Slovenija; e-mail: ivan.ocepek@zaki.si

Prejeto / Received 11. 6. 2020; Sprejeto / Accepted 17. 11. 2020; Objavljeno na spletu / Published online 7. 12. 2020

Ključne besede: Ancyloceratina, *Himantoceras*, *Crioceratites*, valanginij, hauterivij, Severne Karavanke, Slovenija

Key words: Ancyloceratina, *Himantoceras*, *Crioceratites*, Valanginian, Hauterivian, North Karavanke Mts., Slovenia

Izveleček

Predstavljamo in opisujemo valanginijsko-hauterivijsko združbo heteromorfnih amonitov (Ancyloceratina) iz najdišča južno od Leš nad dolino reke Meže (Severne Karavanke). Amoniti so bili najdeni v apnencu tipa pelagični mudstone. Preiskave heteromorfnih amonitov so pokazale prisotnost značilnih spodnjekrednih vrst *Himantoceras trinodosum* (zgornji valanginij) in *Crioceratites* cf. *nolani* (hauterivij). S prisotnostjo še drugih amonitov z Leškega najdišča smo biostratigrafsko potrdili spodnjekredno starost zbrane favne v Severnih Karavankah. Enako pa tudi prvič potrdili prisotnost heteromorfnih amonitov v Sloveniji.

Abstract

The paper deals with newly discovered Valanginian-Hauterivian fauna of heteromorphic ammonites (Ancyloceratina) from locality south of the village of Leše above the Meža River valley (North Karavanke Mountains). Fossils were recovered from the pelagic limestone. Among the studied heteromorphic ammonites are Lower Cretaceous species *Himantoceras trinodosum* (Upper Valanginian) and *Crioceratites* cf. *nolani* (Hauterivian). Based on the accompanied ammonites (Ammonitina) from the outcrop, we biostratigraphically confirm the presence of Lower Cretaceous ammonites fauna in the Northern Karavanke Mountains. This is also the first report on heteromorphic ammonites in Slovenia.

Uvod

Območje Severnih Karavank je bilo v preteklosti večkrat geološko kartirano in proučeno, predvsem zaradi bližine rudnika v Mežici (Štrucl, 1961; Štrucl, 1970). V zadnjem desetletju so območje južno od reke Meže raziskovali tudi zbiralci fosilov, kjer so južno od vasi Leše našli ostanke spodnjekrednih fosilov (sl. 1). Predhodne objave (Ocepek & Krivograd 2018) so kazale na prisotnost heteromorfnih amonitov na omenjenem najdišču. Poleg heteromorfnih amonitov (*Himantoceras trinodosum* in *Crioceratites* cf. *nolani*), ki jih obravnavamo tukaj, so bili iz najdišča določeni tudi še monomorfní amoniti *Lytoceras* cf. *subfimbriatum*, ? *Lytoceras* sp. indet., cf. *Neocomites*

sp., *Olcostephanus* (*Jeannoticeras*) *jeannoti*, cf. *Olcostephanus* (*Jeannoticeras*) sp., *Protetragonites* cf. *quadrisulcatus*, cf. *Protetragonites* sp. in *Spitidiscus rotula* (Ocepek & Krivograd, 2018; Bricman, 2019). Poleg amonitne favne so bili na leškem najdišču odkriti tudi belemniti, polži in aptihi. Tudi preliminarne paleontološke analize (Križnar & Ocepek 2018) so pokazale, da sodi fosilna favna (heteromorfní amoniti) z Leš v obdobje od valanginija do hauterivija. S pričujočim prispevkom želimo predstaviti prve najdbe heteromorfnih amonitov v Sloveniji, ki so ob pomanjkanju mikrofosilov omogočili določiti starost plasti iz najdišča.

Geološka zgradba Leš z okolico

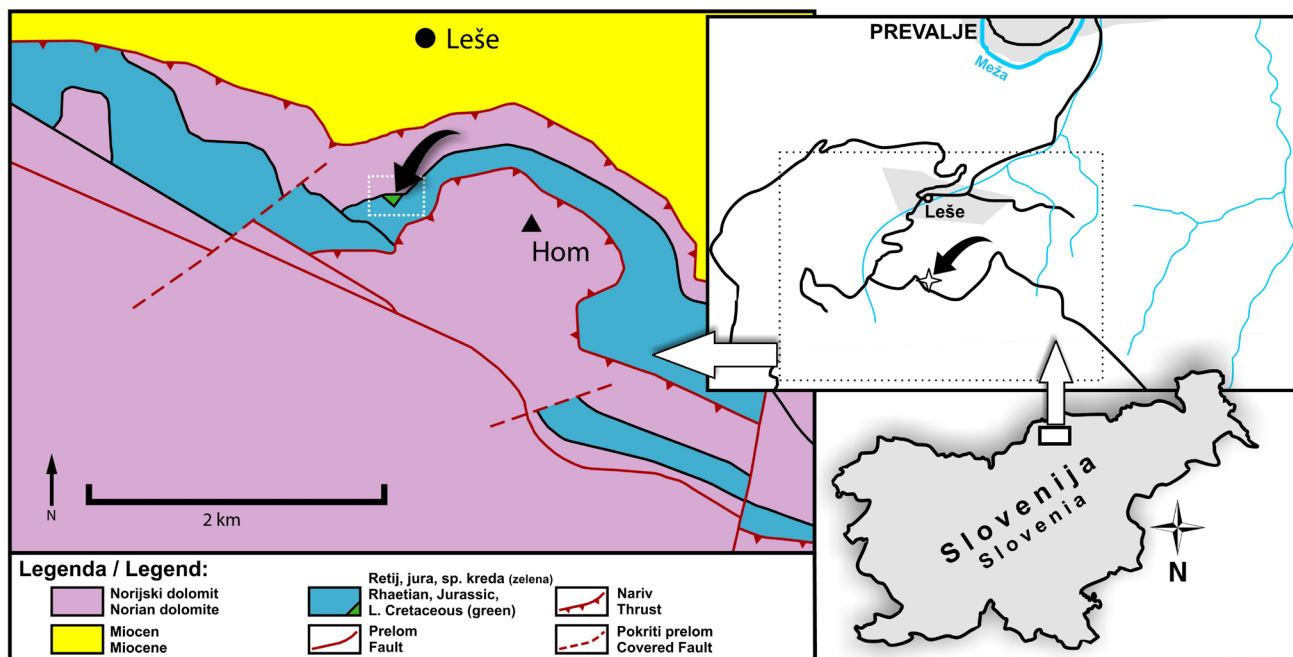
Zgornjejurske plasti v Severnih Karavankah na območju Slovenije, natančneje med Mežico in Slovenj Gradcem je prvi opisal Lipold (1856). Na Črnem vrhu je med drugim našel nedoločljive amonite ter ramenonožce. Leto kasneje je na tem območju raziskoval Rolle (1857), ki je na severnem pobočju Uršlje gore odkril siv, rumenkasto rjav ter rahlo rdeč apnenec z vmesnimi plastmi zrnatega apnenca. V teh plasteh je našel ostanke amonitov, školjk in morskih lilij. Pozneje je Teller (1888) ugotovil, da te plasti pripadajo med drugim tudi zgornjejurskim plastem in pridobljeni podatki so bili kasneje uporabljeni za izdelavo geološke karte v merilu 1:75.000 (Teller, 1898). O razvoju jurskih plasti med Mežico in Slovenj Gradcem sta poročala tudi Ramovš in Rebek (1970). Štrucl (1966) piše, da se rdečkasto rjavi gomoljasti apnenci, ki prevladujejo v zgornjem delu jurske skladovnice ter lapornati apnenci in laporji pojavljajo na širšem prostoru mežiških rudnikov.

Zgornjejurske in spodnjekredne plasti v Severnih Karavankah sta v svojem delu podrobneje opisala Mioč in Šribarjeva (1975). Litološko sta te plasti opisala kot ploščaste laporaste mikritne apnenca s pelagično mikrofavno, ki je bila zaradi odsotnosti jasnih litoloških značilnosti ključna za stratigrafsko umestitev teh plasti. Kamnine iz časa pozne jure/zgodnje krede sta umestila v tretji horizont jurskih kamnin, ki ga po njunem

sestavljajo sivkasto zeleni ter rdečkasto rjavi ploščasti laporasti mikritni apnenci s polami ter gomolji roženca. Na osnovi kalpionel sta v tem horizontu ločila štiri kalpionelidne cone in sicer: *Crassicollaria*, *Calpionella*, *Calpionellopsis* in *Calpionellites* cone. Te zavzemajo časovni razpon od poznega tithonija do vključno valanginija (Mioč & Šribar, 1975) na osnovi prisotnosti vrst *Calpionella alpina* Lorenz, *Calpionella elliptica* Cadisch in *Tintinnopsella carpathica* (Murgeanu & Filipescu). Ker Mioč in Šribarjeva (1975) v plasteh domnevno zgornjejurskega apnenca nista našla makrofavne in je sediment le drobnozrnat, sta predvidevala, da so se apnenci odlagali v globokomorskem okolju z nizko energijo. Na globokomorsko okolje nakazuje tudi prisotnost roženca.

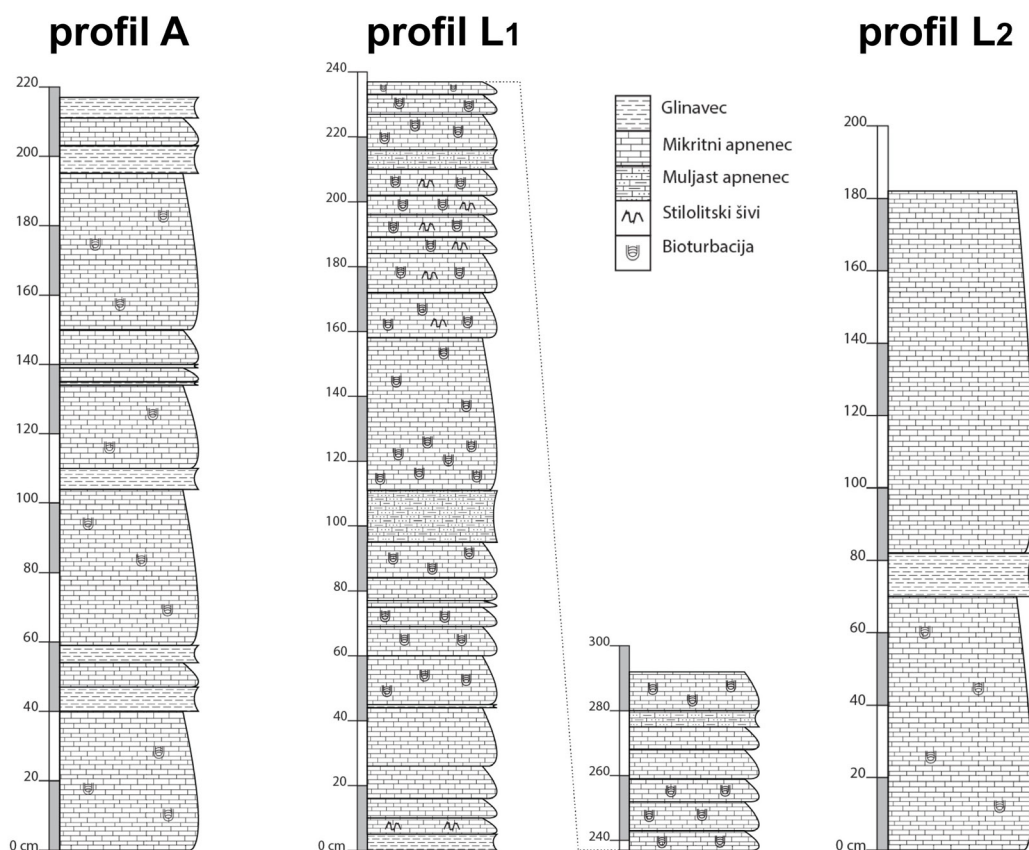
Kasneje je bila v okviru Geoparka Karavanke izdelana geološka karta (Polting & Herlec, 2012), ki zajema tudi geološko zgradbo okolice Leš. Polting in Herlec na območju Severnih Karavank prikazujeta spodnjekredne plasti, ki jih imenujeta sive plasti z aptihi (Polting & Herlec, 2012). Apnenec je verjetno ekvivalent kamninam Schrambach formacije v Avstriji (Lukeneder, 2004).

Leta 2018 sta lokalna zbiralca Ivan Ocepek in Franc Krivograd objavila članek o spodnjekrednih fosilih z Leš pri Prevaljah (Ocepek & Krivograd, 2018). Ocepek in Krivograd (2018) sta v delno opuščnem lokalnem kamnolomu našla



Sl. 1. Geografska lega in poenostavljena geološka karta okolice najdišča spodnjekredne favne pri Lešah. Prirejeno po Ramovš & Rebek (1970).

Fig. 1. Geographic position of fossil site and simplified geological map of the Lower Cretaceous outcrop near Leše. Modified after Ramovš & Rebek (1970).



Sl. 2. Izdanek (manjši kamnolom) južno od Leš pri Prevaljah z označenim položajem posnetih profilov (A, L1 in L2). Po Bricman (2019).

Fig. 2. Outcrop (small quarry) south of Leše near Prevalje with position of the measured sections (A, L1 and L2). After Bricman (2019).

ostanke amonitov, polžev, belemnita ter redke aptihe. Prvič iz območja Slovenije omenjata in prikazujeta tudi ostanke heteromorfnih amonitov (Ocepek & Krivograd, 2018). Prve preliminarnе določitve njihovih najdb heteromorfnih amonitov sta predstavila tudi Križnar in Ocepek (2018).

Bricman (2019) je posnel zaporedje v kamnolomu (sl. 2). Poudariti je potrebno, da so bili vsi najdeni ostanke amonitov odkriti na sekundarnem mestu, pod raziskanimi profili, ki jih je obdelal Bricman (2019). Našel je slabo ohranjene ostrako-

de, radiolarije, foraminifere in redke kalpionele, med katerimi je določil vrsto *Calpionella alpina* Lorenz (Bricman, 2019). Kamnino je opredelil kot pelagični mudstone.

Material in metode

Skupno 46 preiskanih primerkov amonitov je del paleontološke zbirke Ivana Ocepka s Prevalj. Posamezni primerki heteromorfnih amonitov je mehansko prepariral I. Ocepek. Biostratigrafsko razčlenitev (sl. 3) smo povzeli po Grün & Blau (1997), Pop (1997) in Lukender (2004). Fotografije

obravnanih primerkov so bile posnete s fotoaparatom Nikon D7200 in objektivom AF-S Micro NIKKOR 60mm f/2.8G ED v fotografskem studiu Prirodoslovnega muzeja Slovenije. Digitalna obdelava fotografij je bila opravljena s pomočjo programa Adobe Photoshop Lightroom 6.

Paleontološki del

Razred: Cephalopoda Couvier, 1798

Podrazred: Ammonoidea Zittel, 1884

Red: Ammonitida Hyatt, 1889

Podred: Ancyloceratina Wiedmann, 1966

Superdružina: Ancyloceratoidea Gill, 1871

Družina: Crioceratitidae Wright, 1952

Poddružina: Crioceratitinae Wright, 1952

Rod: *Crioceratites* Léveillé, 1837

Crioceratites cf. *nolani* (Kilian, 1910)
(Tab. 1, sl. 1-3)

- 1983 *Crioceratites* (*Crioceratites*) *nolani* – Adamíková et al., str. 602, Tab. 2, sl. 1.
1983 *Crioceratites* (*Crioceratites*) *nolani* – Vašíček et al., Tab. 1, sl. 6.
1986 *Crioceratites* (*Cr.*) *nolani* – Vašíček & Michalík, str. 452, Tab. 1, sl. 1.
1992 *Crioceratites nolani* – Ropolo & Salomon, str. 210, Tab.1, sl. 1.
2006 *Crioceratites nolani* – Lukeneder & Aspmaier, str. 76, Tab. 5, sl. 10-11.
2009 *Davouxiceras nolani* – Vašíček et al., str. 137, Tab. 4, sl. 2.

Material: Dva primerka iz profila A in L1; prvi primerek (Tab. 1, sl. 1, 2) je sestavljen iz izbočenega (pozitivnega) dela ter (negativnega) odtisa. Fragmokon je skoraj v celoti ohranjen, manjka le srednji del zadnjega zavoja. Začetni del prekriva kamnina; fragmokon je limonitiziran. Drugi primerek (Tab. 1, sl. 3) ima obliko fragmokona v celoti ohranjeno. Del fragmokona, predvsem njegov začetek prekriva kamnina; fragmokon je limonitiziran.

Opis: Fragmokon je planispiralno zavrt, devoluten, v stranskem pogledu eliptične oblike, v frontalnem pogledu platikoničen. Prečni preseki zavojev je kroglast. Višina zavojnice konstantno in enakomerno narašča. V začetnem (prvo vidnem) delu je visoka 3 mm, na koncu zadnjega zavoja 23 mm. Na zunanji površini fragmokona so vidna glavna (tuberkulatna) rebra, med katerimi je vidnih <10 plitvejših reber. Razdalja med glavnimi rebri je 15 mm, medtem ko so vmesna rebra po 1 mm narazen. Rebra potekajo pravo-

kotno na smer zavojnice. Rebra so tudi rahlo izbočena (konveksna) proti ustju. Poleg reber so ventralno nameščene bodice. Anteriorno so bodice rahlo konkavne, skoraj ravne, zadnja stran pa je nekoliko bolj izrazito ukrivljena. Bodice so razporejene v večjih razmikih kot rebra – dve bodici, ki sta vidni v zadnjem zavoju, sta 21 mm narazen in merita 9 mm v višino (Tab. 1, sl. 1, 2).

Razprava: Ker ni mogoče natančno določiti števila majhnih radialnih reber med tuberkulatnimi rebri, primerkov ne moremo popolnoma natančno vrstno opredeliti. Primerka kažeta podobnosti z vrstama *C. nolani* in *C. duvali*, ki se ločita po številu medtuberkulatnih reber. Ta so pri *C. duvali* bolj izrazita ter bolj zavita kot pri *C. nolani*. *Crioceratites nolani* ima hišico bolj eliptične oblike. Drugi primerek (Tab. 1, sl. 3) je glede na morfologijo zavojev podoben primerku vrste *C. loryi*, ki je prikazan v delu Vašíček & Michalík (1986, 451, tab 1., sl. 4). Primerka sta bila opredeljena kot *C. cf. nolani* zaradi nekoliko slabše ohranjenosti hišic in neznačilnih bodic, čeprav je tudi vrsta *C. nolani* morfološko zelo heterogena.

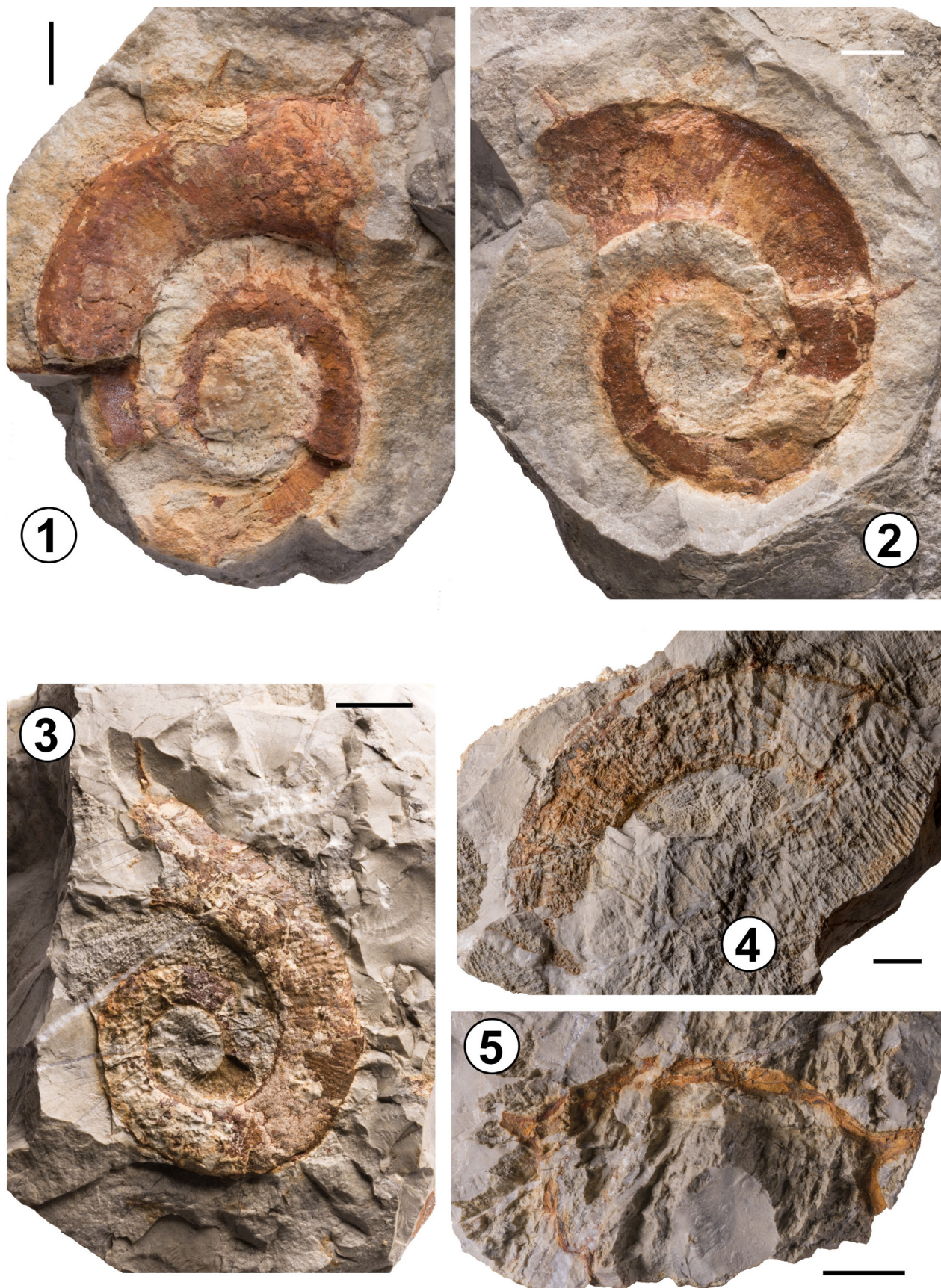
Geografska razširjenost in stratigrafski razpon: Vrsta *Crioceratites nolani* je pogosta v Franciji (Charollais et al., 1993; Reboulet & Atrops, 1999), Slovaški - zahodni Karpati (Vašíček & Michalík, 1986; Vašíček, 2002, 2005), Italiji – Dolomiti (Lukeneder & Aspmaier, 2006), Avstriji – Severne Apneniške Alpe (Lukeneder, 2004, 2014), Srbiji – Stara Planina (Vašíček et al., 2009). Vrsta se pojavlja od srednjega dela spodnjega hauterivija (Reboulet & Atrops, 1999; Lukeneder, 2004; Vašíček et al., 2009) do spodnjega barremija (Vašíček et al., 1983). Večina avtorjev opisuje vrsto *C. nolani* kot tipično hauterivijsko vrsto.

Crioceratites sp. ex gr. *nolani* (Kilian, 1910)
(Tab. 1, sl. 4)

Material: En primerek iz profila L1; del zavoja, prekinjen s kalcitno žilo; površina je limonitizirana, ponekod prekrita s kamnino.

Opis: Viden je močno ukrivljen devoluten fragmokon, ki se proti ustju širi. Prvi vidni del je širok 17 mm, zadnji vidni del pa 27 mm. Na površini fragmokona se pojavljajo rahlo izbočena rebra z medsebojno razdaljo 1,5 mm. Rebra so pravokotna na ukrivljenost zavoja. Proti koncu vidnega dela je močnejše rebro, ki je vidno tudi na ventralnem delu fragmokona. Na ventralnem delu sta prav tako vidni dve bodici, ki nista v celoti ohranjeni. Razdalja med bodicama je 29 mm. Proksimalna (notranja) bodica je na začetku rasti široka 2,5 mm.

Tabla 1 – Plate 1



Heteromorfní amoniti iz spodnjekrednih plasti pri Lešah / Heteromorph ammonites from Lower Cretaceous beds at Leše.

1-2 *Crioceratites* cf. *nolani* (Kilian, 1910). Profil A / Section A.

3 *Crioceratites* cf. *nolani* (Kilian, 1910). Profil L1 / Section L1.

4 *Crioceratites* sp. ex gr. *nolani* (Kilian, 1910). Profil L1 / Section L1.

5 ? *Crioceratites* sp. A. Profil A / Section A.

Merilo / Scale bar 10 mm.

? *Crioceratites* sp. A

(Tab. 1, sl. 5)

Material: En primerek iz profila A; ohranjen je le obod zavoja v prečnem preseku. Fragmokon je limonitiziran.

Opis: Fragmokon je v prečnem preseku na ventralni strani široko zaobljen, dorzalno pa se zoži. Sama lupina je debela 5 mm na proksimalni strani in le 2 mm na distalni strani. Na obeh zgornjih robovih zavoja sta vidni bodici, ki nista ohranjeni v celotni višini.

Razprava: Zaradi slabe razgaljenosti ostanka ni mogoča natančna taksonomska opredelitev. Na podobnost z rodом *Crioceratites* kažejo bodice, podobno kot ostali primerki uvrščeni v ta rod z Leškega nahajališča.

Družina: Himantoceratidae Dimitrova, 1970

Rod: *Himantoceras* Thieuloy, 1964*Himantoceras trinodosum* Thieuloy, 1964

(Tab. 2, sl. 1-3)

- 1964 *Himantoceras trinodosum* nov. sp. - Thieuloy, str. 206, Tab. 8, sl. 1a, 1b.
 1996 *Himantoceras trinodosum* - Reboulet, str. 344, Tab. 25, sl. 6-11.
 2003 *Himantoceras* cf. *trinodosum* - Lukeneder, str. 186, Tab. 2, sl. 5-7.
 2005 *Himantoceras trinodosum* - Vašiček, str. 250, Tab. 4, sl. 3-4.

Material: Trije primerki vsi iz profila A; pri prvem (Tab. 2, sl. 1) je ohranjen le del zavoja, površina je limonitizirana, ponekod prekrita s kamnino. Drugi primerek (Tab. 2, sl. 2) ima zelo dobro ohranjen del zavoja, ob robu je vidna limonitizacija. Tretji (Tab. 2, sl. 3) ima delno ohranjen del zavoja. Na robovih primerka je vidna limonitizacija.

Opis: Fragmokon je rahlo ukrivljen in devoluten. Pri prvem primerku je širok 9 mm. Vidna so rahlo zavita rebra. Razmak med njimi je 1,5 mm. Pri drugem primerku (Tab. 2, sl. 2) so vidna izrazito izbočena rebra, ki so proti ventralnemu delu rahlo zavita. Razdalja med njimi je enakomerna in znaša 2 mm. Na notranjem delu zavoja ni vidnih reber, medtem ko se na ventralnem delu jasno vidijo. Širina zavoja je enakomerna in znaša 12 mm. Pri tretjem primerku (Tab. 2, sl. 3) je viden rahlo zavrt, enakomerno visok zavoj, katerega višina znaša 25 mm. Frontalno gledano ima na desni strani vidna tri do štiri srednje izrazita rebra. Razdalja med njimi je 3 mm. Rebra so pra-

vokotna na obliko zavoja ter niso ukrivljena.

Razprava: Zaradi gostih, enakomerno razporejenih in zavrtih reber, zavoja, ki je devoluten in rahlo podaljšan ter le rahlo ukrivljen, ostanke pripisujemo vrsti *H. trinodosum*.

Geografska razširjenost in stratigrafski razpon: Heteromorfnost vrsta *H. trinodosum* se pojavlja v Franciji (Reboulet & Atrops, 1999; Reboulet, 2007), Španiji (Vašiček, 2005; Aguado et al., 2018), Slovaški - zahodni Karpati (Vašiček & Michalík, 1986), Avstriji (Lukeneder, 2004; Lukeneder, 2003) in Bolgariji (Vašiček, 2005).

Vrsta *H. trinodosum* se na evropskih najdiščih pojavlja v zgornjem valanginiju (Vašiček & Michalík 1986; Reboulet & Atrops, 1999; Vašiček, 2005; Lukeneder, 2003).

Himantoceras cf. *trinodosum* Thieuloy, 1964

(Tab. 2, sl. 4)

Material: En primerek iz profila A; zavoj je vmes prekinjen. Površina zavoja je limonitizirana.

Opis: Viden je en zavoj; višina fragmokona se z dolžino veča. Proksimalno je fragmokon širok 8 mm, distalno pa 17 mm. Na zunanem delu zavoja so vidna proti ustju konveksno ukrivljena rebra; razdalja med njimi je 1 mm.

Razprava: Zaradi podobne oblike ter rahlo podaljšanega zadnjega zavoja bi primerek lahko pripadal vrsti *H. trinodosum*, a zaradi slabo vidnih reber ter neizrazito podaljšanega zavoja tega ni mogoče z gotovostjo trditi. Od tukaj najdenih primerkov te vrste se razlikuje po razdalji med rebri, ki je tukaj manjša. Pri tem primerku je zavoj tudi bolj ukrivljen kot pri *H. trinodosum*.

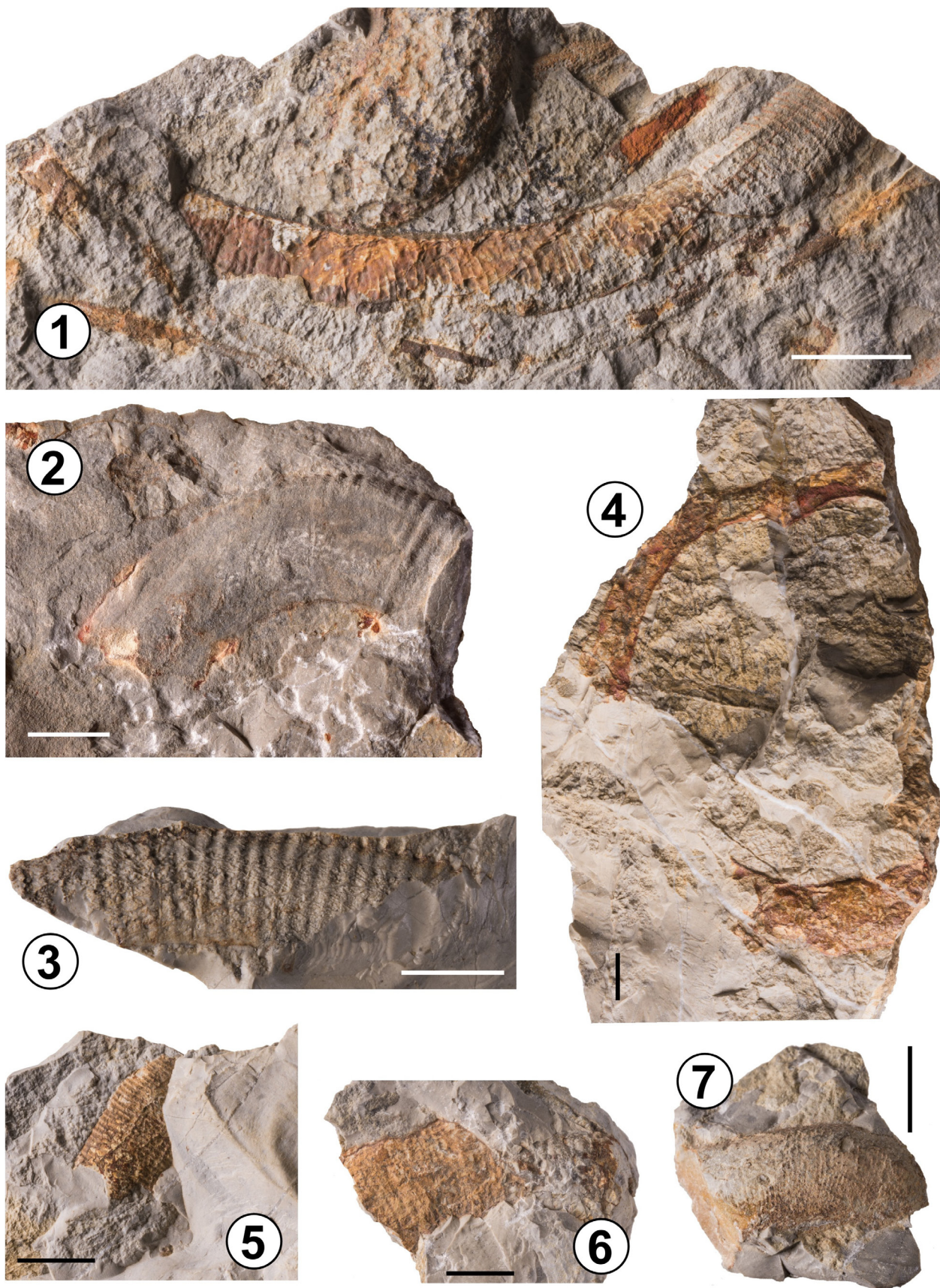
? *Himantoceras* sp. A

(Tab. 2, sl. 5-6)

Material: Dva primerka iz profila A; prvi (Tab. 2, sl. 5) ima dobro ohranjen del zavoja; površina je limonitizirana, ponekod prekrita s kamnino. Drugi (Tab. 2, sl. 6) ima slabo ohranjen fragmokon, površina je limonitizirana. Zavoj je zlomljen, deloma prekrit s kamnino.

Opis: Ohranjeni del fragmokona je širok 14 mm in raven. Vidna so rebra, ki so na eni strani zavoja konveksno, na drugi konkavno zavita. Rebra so med seboj oddaljena 1 mm, razdalja med njimi je enakomerna. Drugi primerek (Tab. 2, sl. 6) ima rahlo zavrt fragmokon. Bočno gledano je presek na distalni strani širok 18,5 mm, debelina pa znaša 7 mm. Na proksimalni strani je širok 20 mm, debelina pa znaša 11,5 mm. Reb-

Tabla 2 – Plate 2



Heteromorfni amoniti iz spodnjekrednih plasti pri Lešah./ Heteromorph ammonites from Lower Cretaceous beds at Leše.

1-3 *Himantoceras trinodosum* Thieuloy, 1964.

4 *Himantoceras* cf. *trinodosum* Thieuloy, 1964.

5-6 ? *Himantoceras* sp. A.

7 ? *Himantoceras* sp. B.

Vsi primerki izhajajo iz profila A / All specimens from section A.

Merilo / Scale bar 10 mm.

ra so vidna, a jih ni mogoče slediti, niti izmeriti razdalje med njimi.

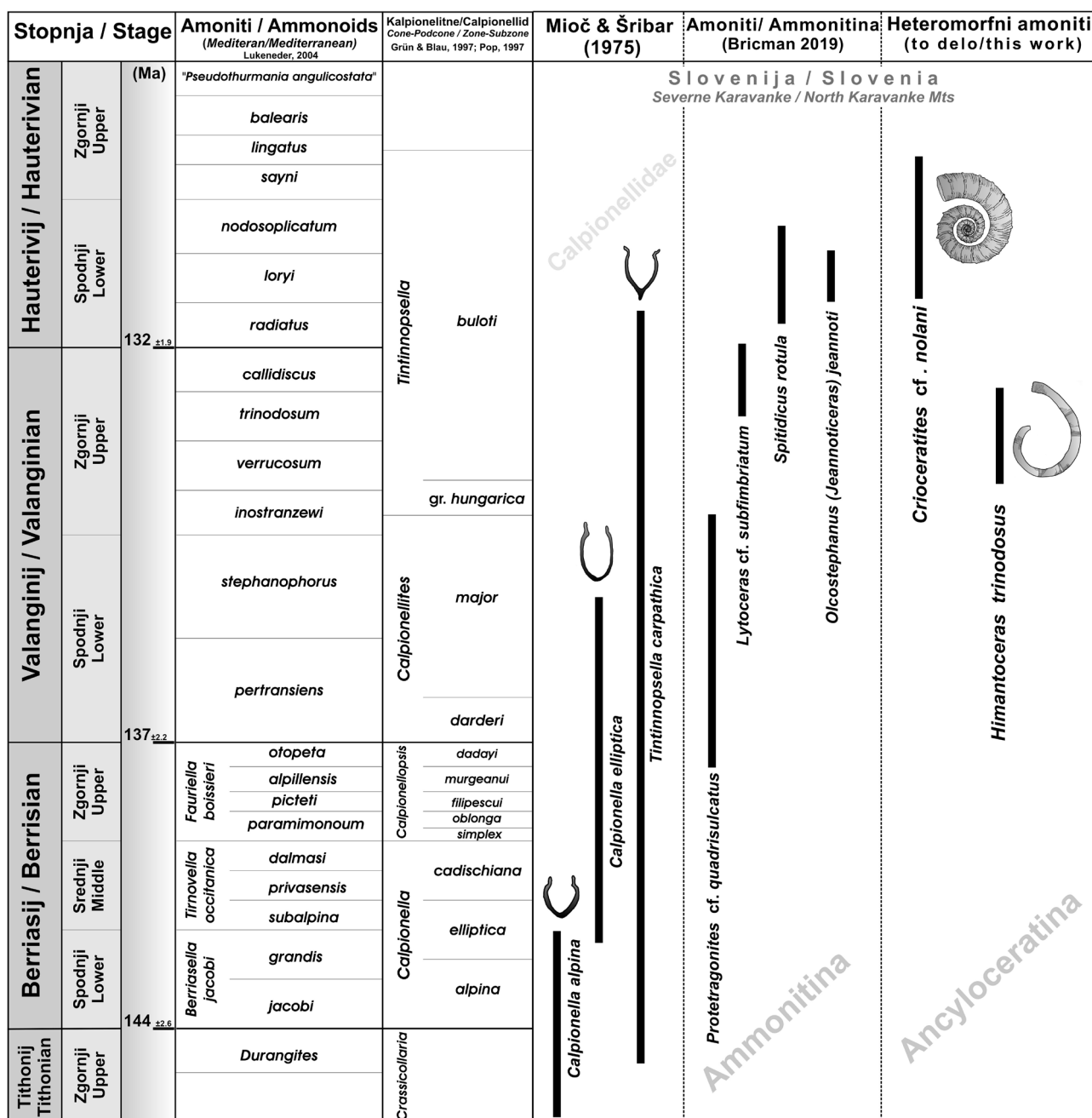
Razprava: Zaradi fragmentiranosti fosila ni mogoče ločiti zunanjšega dela zavoja od notranjšega. Glede na postavitev reber, njihove izrazitosti ter blage ukrivljenosti zavoja menimo, da verjetno pripada rodu *Himantoceras*.

? *Himantoceras* sp. B
(Tab. 2, sl. 7)

Material: Srednje dobro ohranjen del fragmokona (Tab. 2, sl. 7) iz profila A; viden je predvsem ventralni del zavoja. Površina fragmokona je limonizirana.

Opis: Na rahlo ukrivljenem fragmokonu so vidna rahlo izbočena gosta, med seboj enakomerno oddaljena rebra. Razdalja med njimi znaša 0,5–0,7 mm.

Razprava: Od primerka ? *Himantoceras* sp. A se ta primerek razlikuje po velikosti, ukrivljenosti zavoja ter izrazitosti (vidnih) reber.



Sl. 3. Prikaz stratigrafskega razpona mikrofosilov, amonitov (za Mediteransko conacijo) in heteromorfnih amonitov (Ancyloceratina) iz najdišča pri Lešah (predvideni stratigrafski razponi). Fosilni ostanki po Mioč & Šribar (1975), Križnar & Ocepek (2018), Bricman (2019). Ma – milijon let.

Fig. 3. Stratigraphical distribution of the microfossils, ammonites (Mediterranean zonation) and heteromorphic ammonites (Ancyloceratina) from the Leše locality (possible stratigraphic ranges). Fossil remains after Mioč & Šribar (1975), Križnar & Ocepek (2018), Bricman (2019). Ma – milion yers.

Razprava in zaključki

Zbrana in raziskana favna, ki je bila odkrita južno od Leš nad dolino Meže, vsebuje prve znane primere heteromorfnih amonitov v Sloveniji.

Ob redkosti mikrofosilov, so odkriti amoniti (odkriti na sekundarnem mestu) pomembni za določitev starosti raziskane formacije. Za stratigrafijo leškega najdišča sta pomembna oba najdena rodova heteromorfnih amonitov: *Crioceratites* in *Himantoceras*. Tukaj določena vrsta *Crioceratites* cf. *nolani* kaže na hauterivijsko starost plasti, medtem ko je vrsta *Himantoceras trinodosum* značilna za zgornji valanginij. Obe vrsti sta pogosti v enako starih najdiščih osrednje in zahodne Evrope (Vašíček et al., 1983; Vašíček & Michalík 1986; Reboulet & Atrops, 1999; Lukeneder, 2003; Lukeneder, 2004; Vašíček, 2005; Vašíček et al., 2009). Preostala amonitna favna iz približno 2,4 m debelega profila najdišča (sl. 3) kaže podoben razpon, z izjemo vrste *Protetragonites* cf. *quadrisulcatus*, ki je stratigrafsko nekoliko starejša (zgodnji valanginij) (Reboulet & Atrops, 1999). Na podlagi določene združbe amonitov in kalpionele vrste *C. alpina* s. l. (Grün & Blau 1997, Pop 1997) je starost plasti v izdanku uvrščena v širši stratigrafski razpon med zgornji del tithonija in začetek poznega hauterivija. Za še temeljitejšo stratigrafsko razčlenitev nekaj metrskega profila pa bodo potrebne dodatne raziskave.

Amonitna favna z Leš vsebuje vrste značilne za Mediteransko bioprovincio in kaže veliko podobnost z najdiščem Kaltenleutgeben pri Dunaju (Lukeneder, 2003). Drugo primerljivo najdišče leži v Dolomitih (najdišče Puez) (Lukeneder & Aspmaier, 2006), kjer se med heteromorfnimi amoniti pojavlja predvsem *Crioceratites nolani*. Z leškimi najdiščem ga lahko primerjamo tudi v litološkem smislu, saj osrednji del italijanskega najdišča kamnine vsebujejo rožence in karbonatne konkrecije, ki pogosto vsebujejo amonitne ostanke (Lukeneder, 2004; Lukeneder & Aspmaier, 2006).

Leško najdišče torej dobro dopolnjuje paleontološko in biostratigrafsko sliko spodnjekrednega okolja Mediteranske bioprovince.

Conclusions

Mesozoic beds south of the Meža River valley between Mežica and Slovenj Gradec were investigated by numerous geologists (Lipold, 1856; Rolle, 1857; Teller, 1888). Most of the surrounding beds are mainly Upper Triassic and Jurassic in age, which are partly covered by Miocene sediments. Previous biostratigraphical and micropaleontological investigations indicated the presence of

Lower Cretaceous beds in some outcrops (Mioč & Šribar, 1975) (Fig. 3). In one of the outcrop, within abandoned local quarry south of Leše (Figs. 1, 2) good to poorly preserved fossil fauna was collected (by I.O.), represented by ammonites (with heteromorphic forms), belemnites, gastropods and rare aptychi (Ocepek & Krivograd, 2018; Križnar & Ocepek, 2018; Bricman, 2019). In the platy limestone (type pelagic mudstone) remains of heteromorphic ammonites (Ancyloceratina) were found and taxonomically investigated. *Himantoceras trinodosus* (Plate 2; Fig. 3) indicates middle part of the Upper Valanginian (Vašíček & Michalík 1986; Reboulet & Atrops, 1999; Vašíček, 2005; Lukeneder, 2003), whereas the second heteromorphic ammonite *Crioceratites* cf. *nolani* (Plate 1; Fig. 3) is Hauterivian species by most researchers (Reboulet & Atrops, 1999; Lukeneder, 2004; Vašíček et al., 2009). Based on the determined ammonites and calpionellid species *C. alpina* s. l. (Grün & Blau 1997, Pop 1997) the age of the strata in the Leše section is ranged in the late Tithonian – Hauterivian interval. With additional ammonites fauna (Bricman, 2019) the Lower Cretaceous beds from outcrop near Leše (North Karavanke Mountains) clearly indicate Valanginian and Hauterivian age (Fig. 3). Further biostratigraphic study with collecting in this site will probably provide new data. For now, the Leše site is the first location with heteromorphic ammonites in Slovenia.

Zahvala

Avtorji se zahvaljujemo in prispevek posvečamo Koroškemu zbiralcu Francu Krivogradu (1941-2020), ki je pomagal pri zbiranju paleontološkega gradiva in vodenja po terenu.

Literatura

- Adamíková, G., Michalík, J. & Vašíček, Z. 1983: Composition and ecology of the "Pseudothurmannia fauna", lower barremian of the Krížna-nappe in the Stražovské vrchy mts. *Geologica Carpathica*, 34/5: 591 – 615.
- Aguado, R., Company, M., Castro, J.M., de Gea, G.A., Molina, J.M., Nieto, L.M. & Ruiz-Ortiz, P.A. 2018: A new record of the Weissert episode from the Valanginian succession of Cehegín (Subbetic, SE Spain): bio- and carbon isotope stratigraphy. *Cretaceous Research*, 92: 122-137. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2018.07.010>
- Bricman, A. 2019: Spodnjekredna amonitna združba z Leš pri Prevaljah. Raziskovalna

- naloga, Oddelek za geologijo, NTF, Univerza v Ljubljani: 39 str. Internet: <https://repozitorij.uni-lj.si/Dokument.php?id=122773&lang=slv> (8.6.2020)
- Charllais, J, Atrops, F. & Busnardo, R. 1993: Précisions stratigraphiques sur les Collines du Faucigny, Préalpes ultrahelvétiques de Haute-Savoie (France). *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 86, 2: 397-414.
- Cuvier, G. 1798: Tableau élémentaire de l'histoire naturelle de Animaux. De l'Institut National de France, Paris: 710 p.
- Dimitrova, N. 1970: Phylogenese des Ammonites heteromorphes du Cretace inferieur. *Bulletin of the Geological Institute Sofia, Series Paleontology*, 19: 71-110.
- Gill, T. 1871: Arrangement of the families of mollusks. *Smithsonian Miscellaneous Collections*, 227: 1-49.
- Grün, B. & Blau, J. 1997: New aspects of calpionellid biochronology: proposal for a revised calpionellid zonal and subzonal division. *Revue de Paléobiologie.*, 16/1: 197-214.
- Hyatt, A. 1889: Genesis of the Arietidae. *Smithsonian contributions to knowledge.*, 673: 238 p.
- Kilian. W. 1910: Das Mesozoicum. Kreide (Unterkreide, Palaeocretacium). In: Frech, F. (ed.): *Lethaea Geognostica* (Schweizerhart). Stuttgart, 3/2: 1-398.
- Križnar, M. & Ocepek, I. 2018: Prve najdbe heteromorfih amonitov (Ancyloceratina) v Sloveniji. In: Novak, M. & Rman, N. (eds.): *Zbornik povzetkov*, 5. Slovenski geološki kongres, Velenje, 3.-5. 10. 2018, *Geološki zavod Slovenije*: 115-116.
- Léveillé, C. 1837: Description de quelques nouvelles coquilles fossiles du département des Basses-Alpes. *Mémoires de la Société géologique de France*, 10: 313-315.
- Lipold, M.V. 1856: Die alpine Lias- und Jura-Formation im südöstlichen Theile von Kärnten. *Jahrbuch der Kaiserlich Königlichen Geologischen Reichsanstalt*, 7: 193.
- Lukeneder, A. 2003. Ammonoid stratigraphy of Lower Cretaceous successions within the Vienna Woods (Kaltenleutgeben section, Lunz Nappe, Northern Calcareous Alps, Lower Austria). In: Piller, W. E. (ed.): *Stratigraphia Austriaca*. Österreichische Akademie der Wissenschaften, Schriftenreihe der Erdwissenschaftlichen Kommissionen, 16: 165 – 191.
- Lukeneder, A. 2004: Stratigrafische Erkenntnisse aus einem neuen Vorkommen von Unterkreide-Ammonoideen in der Losensteiner Mulde (Ternberger Decke, Nordliche Kalkalpen). *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, 144: 173-189.
- Lukeneder, A. 2014: Cretaceous ammonites from Upper Austria. *Denisia*, 32/157: 59-79.
- Lukeneder, A. & Aspmaier, C. 2006: Stratigraphic implication of a new Lower Cretaceous ammonoid fauna from the Puez area (Valangianian-Aptian, Dolomites, Southern Alps, Italy). *Geo. Alp*, 3: 55-83.
- Mioč, P. & Šribar, L. 1975: Jurski skladi v severnih Karavankah. *Geologija*, 18: 87-97.
- Ocepek, I. & Krivograd, F. 2018. Spodnjekredni fosili z Leš pri Prevaljah. *Konkrecija*, 7: 48-51.
- Polting, W. & Herlec, U. 2012: Geologisch – Naturschutzfachliche Grundlagen des Geoparks Karawanken. *Geopark Karavanke*: 199 p. Internet: www.geopark-karawanken.at/files/2012_geopark_karawanken_naturschutzfachliche_grundlagen.pdf (9.6.2020)
- Pop, G. 1997: Tithonian to Hauterivian praecalpionellids and calpionellids: bioevents and biozones. *Mineralia Slovaca*, 29: 304-305.
- Ramovš, A. & Rebek, R. 1970: Razvoj jurskih skladov med Mežico in Slovenj Gradcem. *Geologija*, 13: 105-114.
- Reboulet, S. 1996: L'évolution des ammonites du Valanginien-Hauterivien inférieur du bassin vocontien et de la plate-forme provençale (Sud-Est de la France). Relations avec la stratigraphie séquentielle et implications biostratigraphiques. *Documents du Laboratoire de Géologie de Lyon*, 137: 1-371.
- Reboulet, S. 2007: Diversification des ammonoids hétéromorphes: l'exemple des Himantoceras. Evolution et changements paléoenvironnementaux au Vallanginien. *Bulletin de l'Association Géologique Audoise*, 28: 13-35.
- Reboulet, S. & Atrops, F. 1999: Comments and proposals about the Valanginian-Lower Hauterivian ammonite zonation of south-eastern France. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 92/1: 183-197.
- Rolle, F. 1857: Geologische Untersuchungen in der Gegend zwischen Weitenstein, Windisch-Gratz, Cilli und Oberburg in Untersteiermark. *Jahrbuch der Kaiserlich Königlichen Geologischen Reichsanstalt*, 8: 403-465.
- Ropolo, P. & Salomon, M. 1992: Evolution du déroulement - Passage du stade criocératique au stade subaspino-cératique ou protacriocératique- chez certaines populations d'ammonites hétéromorphes de l'Hauterivien moyen (zones à *Nodosoplicatum* et à *Sayni*). *Géologie Méditerranéenne*, 19/3: 189-227.

- Štrucl, I. 1961: Geološke značilnosti mežiškega rudišča s posebnim ozirom na kategorizacijo rudnih zalog. *Geologija*, 6: 251-278.
- Štrucl, I. 1966: Geološke značilnosti mežiškega rudišča s posebnim ozirom na kategorizacijo rudnih zalog. Monografija 300 let mežiški rudniki, DRMGZ, Mežica: 115-139.
- Štrucl, I. 1970: Stratigrafske in tektonske razmere v vzhodnem delu severnih Karavank. *Geologija*, 13: 5-20.
- Teller, F. 1888: Kössener Schichten, Lias und Jura in den Ost-Karawanken. *Verhandlungen der K.K. Geologischen Reichsanstalt*, 4: 110-117.
- Teller, F. 1898: Erläuterungen zur Geologischen Spezialkarte der Österr.-Ungar. Monarchie. Eisenkapel und Kanker. *Verl. der k. k. Geologischen Reichsanstalt, Wien*: 142 p.
- Thieuloy, J. P. 1964: Un Céphalopode remarquable de l'Hauterivien basal de la Drôme: *Himantoceras* nov. gen.. *Bulletin de la Société Géologique de France*, S7-VI/2: 205-213.
- Vašíček, Z. 2002. Lower Cretaceous Ammonoidea in the Podbranč quarry (Pieniny Klippen Belt, Slovakia). *Bulletin of the Czech Geological Survey*, 77/3: 187-200.
- Vašíček, Z. 2005: The oldest (Late Valanginian) Crioceratitinae (heteromorphic ammonoids) from the Central Western Carpathians (Slovakia). *Geologica Carpathica*, 56/3: 245-254.
- Vašíček, Z. & Michalík, J. 1986: The Lower Cretaceous ammonites of the Manín unit (Mt. Butkov, West Carpathians). *Geologica Carpathica*, 37/4: 449-481.
- Vašíček, Z., Michalík, J. & Borza, K. 1983: To the »Neocomian« biostratigraphy in the Krížna-Nape of the Strážovské Vrchy Mountains (Northwestern Central Carpathians). *Zitteliana*, 10: 467-483.
- Vašíček, Z., Rabrenović, D., Radulović, V. & Radulović, B. 2009: Late Valanginian-Hauterivian cephalopod fauna from the Stara Planina Mountain (eastern Serbia). *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie*, 251/2: 129-145. <https://doi.org/10.1127/0077-7749/2009/0251-0129>
- Wiedmann, J. 1966: Stammesgeschichte und System der posttriadischen Ammonoiten. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen*, 127: 13-81.
- Wright, C.W. 1952: A classification of the Cretaceous ammonites. *Journal of Paleontology*, 26: 213-222.
- Zittel, K.A. von 1884: Cephalopoda. In: Zittel, K.A. (ed.): *Handbuch der Paläontologie*, Band 1, Abt. 2/3: 329-522.



Peripatetic careers of Vsevolod and Eugenie Gorsky, mid-20th century Slovenian-educated geoscientists

Popotna kariera Vsevoloda in Evgenije Gorski, študentov geologije in rudarstva v Sloveniji na začetku 20. stoletja

Sharad MASTER

EGRI, School of Geosciences, University of the Witwatersrand, P. Bag 3, WITS 2050, Johannesburg, South Africa;
e-mail: sharad.master@wits.ac.za

Prejeto / Received 2. 1. 2020; Sprejeto / Accepted 16. 11. 2020; Objavljeno na spletu / Published online 7. 12. 2020

Key words: geology, mining, letters, Russia, South Africa, Slovenia

Ključne besede: geologija, rudarstvo, pisma, Rusija, Južna Afrika, Slovenija

Abstract

In September 1947, South Africa's most famous geologist, Dr Alexander Logie du Toit, FRS, well known for his support of the concept of Continental Drift, received a visit from a Slovenian-educated Russian émigré couple, Vsevolod and Eugenie Gorsky, who were newly arrived in South Africa. Vsevolod, born in what is now Ukraine, was a mining engineer, geologist and geophysicist with vast experience in the minerals industry, while his wife Eugenie, born in the Russian Caucasus, was an analytical geochemist. Vsevolod had a brief exchange of letters with du Toit, seeking his help in obtaining employment in South Africa's minerals industry. Included in the first letter to du Toit were detailed curricula vitae of both Vsevolod and Eugenie Gorsky. These detailed CVs allow us to reconstruct the training (at the University of Ljubljana, under the influence of Russian mineralogist V.V. Nikitin) and careers of these two earth science professionals in Slovenia and Macedonia, in the early Twentieth Century, and to follow their peripatetic careers as they left the Kingdom of Yugoslavia before the start of the Second World War, in Cyprus, Egypt, Tanganyika and South Africa. They ultimately ended up in Brazil in the 1960s and 1970s, and probably retired there. Eugenie was constrained to follow her husband wherever his career led him, but she always ended up working in most of the countries and places they found themselves in. As a professional couple who travelled the world, the Gorskys were pioneers in a way of life that is commonplace now in a globalized world.

Izveček

Septembra 1947 je najslavnejšega geologa Južne Afrike, dr. Alexandra Logie du Toita obiskal ruski emigrantski par Vsevolod in Eugenijski Gorski, ki je univerzitetne študije dokončal v Sloveniji. Du Toit je bil član Angleške kraljeve družbe in znan po podpori konceptu premika kontinentov. Vsevolod, rojen v današnji Ukrajini, je bil rudarski inženir, geolog in geofizik z bogatimi izkušnjami na področju industrije mineralnih surovin, medtem ko je bila njegova žena Eugenijski, rojena na ruskem Kavkazu, analitična geokemičarka. Vsevolod si je z du Toitom na kratko izmenjal nekaj pisem in v njih iskal podporo pri zaposlitvi v južno afriški rudarski industriji. V prvem pismu so bili navedeni le podrobni življenjepisi Vsevoloda in Evgenije Gorski. Ti nam omogočajo, da rekonstruiramo šolanje na univerzi v Ljubljani pod vplivom ruskega mineraloga V.V. Nikitina, in razvoj dveh strokovnjakov s področja ved o Zemlji v Sloveniji in Makedoniji. Sledimo lahko njuni popotni karieri, ko sta zapustila Kraljevino Jugoslavijo pred začetkom druge svetovne vojne. Odšla sta na Ciper, v Egipt, Tanganjiko in Južno Afriko. Svojo profesionalno pot sta v šestdesetih in sedemdesetih letih končala v Braziliji in se tam verjetno upokojila. Eugenijski je bila vezana na svojega moža, kamorkoli ga je vodila njegova karierna pot in vedno je delala tam, kamor je zaneslo njenega moža. Gorski sta bila profesionalni par, ki je potoval po svetu. Bila sta pionirja v načinu življenja, ki je v današnjem globaliziranem svetu običajno.

Introduction

In the aftermath of the Second World War, in the late 1940s, there were large migrations of people who had fled their countries, and were now seeking either to return, or to find a new place to live. In Southern Africa there was a huge demand for technical professionals in the Mining Industry, which was one of the most important in the world, having some of the world's largest gold, diamond, chrome and platinum mines (du Toit, 1939).

At that time in South Africa, the most famous geologist was Dr Alexander Logie du Toit, FRS (1878-1948), who had written three definitive books on South African geology and geography (especially du Toit, 1939), and two internationally renowned books concerning comparative geology of wandering continents (du Toit, 1927, 1937), which provided strong support for Alfred Wegener's theories of Continental Drift. Because he had been President of the Geological, Geographical and Archaeological societies of South Africa, as well as having been an Editor of Economic Geology, and Consulting Geologist for the largest diamond mining company, De Beers, he was often contacted or visited by people in connection with Economic Geology, and Southern African geology in general, as well as palaeobotany (Gevers, 1950). Du Toit had retired to his home in Cape Town in 1941, but spent the last seven years of his life actively pursuing his research interests, and doing consulting work in economic geology and geohydrology.

In 1947 du Toit was contacted by a Slovenian-trained mining engineer, Vsevolod Gorsky, who had come to South Africa from Tanganyika, together with his wife Eugenie Gorsky, who was an analytical geochemist. The Gorskys were looking for technical employment in the mining industry of South Africa, in their respective fields, and visited Alex du Toit and his wife Evelyn at their home in Cape Town. Because du Toit had worked in Tanganyika, and had maintained a correspondence with several heads of the Geological Survey Department in Dodoma, it is possible that the Gorskys were introduced to du Toit through that connection. The Gorskys and du Toits were supposed to meet again, but Vsevolod had to go urgently to Pretoria, the capital city, in connection with residence permits. He wrote to du Toit on 14th September 1947, enclosing detailed curricula vitae for both himself and for his wife Eugenie. Du Toit sent a brief letter back, outlining prospects in the chrome industry in South Africa, as well as possibilities of utilizing gyp-

sum in the cement industry, and opportunities in the nascent asbestos industry. Asbestos had been regarded as a strategic mineral during the War, and du Toit (1945) had published a major study on the genesis of amphibole asbestos in South Africa (which also explains why he had "excellent specimens of asbestos" in his collection which he was able to show to Gorsky). Gorsky himself had also worked on asbestos in Cyprus, where chrysotile asbestos deposits were mined in the serpentinites of the Troodos Massif (Sagui, 1925; Henckmann, 1941). Gorsky replied to du Toit from Johannesburg on 28th September 1947, telling him that he had managed to obtain permanent residence status in the country, and that he would be looking for a job in the chrome industry, since that was his "speciality". No further correspondence between the Gorskys and du Toit is preserved in the du Toit archives. Du Toit passed away rather suddenly and unexpectedly just a few months later, on 25th February 1948.

Letters and Curricula vitae

The originals of the letters and curricula vitae reproduced here are in the Alex du Toit Papers (Jagger Library, University of Cape Town).

1. Letter from V. Gorsky to A.L. du Toit, 14 September, 1947

V. Gorsky
146 Yeo Str.
Bellevue East,
Johannesburg,
14th September 1947.

Dear Dr. du Toit,

We left Capetown unexpectedly owing to my business in connection with permit for permanent residence which I hope to get this month. So we lost an opportunity to have once more an enjoyable meeting with you and your wife.

I expect to get an interesting consulting work on problems of beneficiation of rather difficult Platinum, Nickel and Lead Ores.

I touched also a group of S. African people who are very interested in Asbestos and would like to start prospecting of new areas or to acquire a small or medium size mine or favourable deposits.

I understand that besides asbestos bearing areas in the Transvaal, Griqualand, etc. described in the "Mineral Resources of S.A." there are new discoveries and small deposits in Cape Province too. I remember also a few excellent specimens of asbestos I saw in your collection. Please would

be kind to communicate me any information in that connection you may kindly give me. Thanking you in anticipation and wishing all the best to you and your wife both of us, I remain,

Sincerely yours,
V. Gorsky

2. Curriculum vitae, Vsevolod A. Gorsky

Professional Record

Vsevolod A. Gorsky, Qualified Mining Engineer

Born at Proskurov, Russia of 7th August 1898; Yugoslav subject. Married. No children.

Educated at the University of Kharkov, Russia, and Zagreb, Yugoslavia, 1917-1921, Geological Department, and at Technical and Mining Department, University of Ljubljana, Yugoslavia 1922-1926.

Graduated in Ljubljana, Yugoslavia, on 12th November 1926 and received the degree of Mining Engineer.

Received state authorization for private mining practice 1938.

Employments

1926-1929 Assistant Professor of Mine Surveying and Geophysical Prospecting in the Mining Department, University of Ljubljana.

1929-1932 Mine Superintendent and Assistant Technical Director with Allatini Mines Ltd. (registered in London, Skoplje, Yugoslavia).

1932-Consulting Engineer to Coal Mine Nerezi, Skoplje. Simultaneously with the previous service.

1932-1938. General Superintendent (Technical Director) of Chromasseo Mines, Skoplje.

1938-1942 Mine and Mill Superintendent and Chief Engineer with the Cyprus Chrome Company, Limassol, Cyprus.

1942-1943 with Selection Trust Ltd., first as Representative in Cyprus, then in charge of the Wolfram Concentrating Plant in Alexandria, Egypt.

1943-1944 consultant in ore dressing of tin, lead, zinc and other ores for the Egyptian Metal Refining Co., Anglo-Egyptian Chemical Industries, Um Ghaig and El Egly Mines, Cairo. At the same time on special war time service for the Yugoslav Red Cross Society, as a Liaison Officer with the M.E. Relief and Refugee Administration, British Minister of State Office in Cairo, Egypt.

1945-1946 Underground Manager of Uruwira Minerals Ltd., Uvinga, Tanganyika (Lead-Copper-Gold-Silver Mine).

1946 Temporary Metallurgist at the Geological Division, Department of Lands and Mines, Dodoma, Tanganyika Territory.

Other professional activities

1923-1925 student practice in Coal Mines: Trbovlje, Kočevje, Tresibaba, etc., Yugoslavia.

From 1930 Contributing Editor to "Geophysical Abstracts" of U.S. Bureau of Mines, Washington.

From 1936 Member of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, New York.

From 1938 Member of Engineers' Chamber in Belgrade, Yugoslavia.

1923-1932 studying Yugoslav Coal, Iron, Lead, Zinc, Copper, Magnesite and Bauxite Mines and Concentrating Plants.

Travelling to England and France in 1937, to Austria, Belgium and Germany in 1938 for studying ore dressing problems and purchasing Concentrating Plant equipment for the Chromasseo Co.

1940-1942 studying Copper, Gold, Pyrite and Asbestos Mines and Concentrating Plants in Cyprus.

Published 28 papers including original research in geophysics, geochemistry, mining engineering and surveying in Serbo-Croatian, Slovenian & Russian technical and scientific journals and magazines.

Expert knowledge in general mining engineering, economical geology and ore dressing, especially development, underground extraction (stopping), open-cast mining, estimation of ore reserves, testing and concentrating of Chrome, Wolfram, Tin, Lead, Zinc, Nickel and other ores. Wide experience in the mining geology and prospecting of base metal ore.

Wide experience in laboratory investigation and scientific research.

Knowledge of languages: Russian, Serbo-Croatian and Slovenian perfect, English and German good and French fair.

Testimonials and references are available.

3. Curriculum vitae, Eugenie Gorsky

Curriculum vitae
Mrs. Eugenie Gorsky

Nee Gvozdev; born at Vladicaucasus, Russia on
13th December 1902. Yugoslav subject.

Education

8 years of secondary school College in Armavir.
Maturity certificate 1920, Armavir, Russia.

1926–1931 Faculty of Science, University of Ljubljana, Yugoslavia.

Graduated in the Faculty of Science (Philosophical Faculty) of the University of Ljubljana on 19th October 1933. Scientific group: Mineralogy, Petrography, Geology, Paleontology, Chemistry, Physics.

Employment and activities

1931–1933 worked in the assay laboratories of Allatini Mines Ltd and Chromasseo Ltd, Skopje, Yugoslavia.

1938–1941 worked in the drawing office of the Cyprus Chrome Co, Troodos, Cyprus.

1941–1942 worked in the assay laboratory of the Cyprus Chrome Co, Ay. Nicolaos, Cyprus.

From 1.3.1943 to 1.8.1943 Analytical Chemist with the Selection Trust Ltd at the Wolf-ram Concentrating Plant in Alexandria, Egypt.

From 11.9.1943 to 20.10.1944 on military service with the Yugoslav Red Cross Society in Cairo, Egypt. Part time service.

From 1.12.1943 to 30.11.1944 Assayer with the Um Ghaig Mine, Cairo.

From 19.2.1945 to 15.3.1946 Assayer in charge of the assay laboratory of the Uruwira Minerals Ltd., Mpanda near Uvinga, Tanganyika.

Published an original research "Petrography of the Mine Casak near Skoplje", Bulletin des service geologique de Yougoslavie, vol. 5, Belgrade 1937 (Summary in German), a thesis intended for submission for the degree of Ph. Dr. The final examination was not taken owing to departure from Yugoslavia in 1938 and the war.

Expert knowledge in mineralogy, petrology and especially in the use of Fedorov universal method; also in inorganic chemical analysis and especially mineral, rock and soil analysis and in the assay of the ores of chromium, wolfram, lead, zinc, tin, copper, iron, nickel, gold, silver etc. Experience in technical drawing.

Testimonials and references available.

4. Letter from A.L. du Toit to V. Gorsky, 22 September, 1947

2 Bye Way,
Pinelands
Cape Town
22 Sept., 1947

Mr V. Gorsky
146 Yeo St.
Bellevue East

Dear Mr Gorsky

I reply to your letter of the 14th Sept. I should like to tell you that I had to go to the Northern Transvaal not long after I had seen you, & that, when I enquired at Sea Point, I found that your wife & yourself had already gone to Johannesburg. I was myself in Johannesburg on the 10th but of course did not know your address.

I hope that you may obtain a permit for permanent residence & am pleased to observe that in the meantime, you have been able to make certain contacts in mineral problems, which I trust may lead to important consulting business.

There are several cases in which beneficiation of ore would seem of some importance. One of these is that of the Chromite ore of the Bushveld, seeing that a good deal of it just falls below the standard. Another curiously is that of Gypsum, where used & mined by Cement Companies, though I understand it is being applied at one spot at Windsorton Road.

As for asbestos, there is room for improvement of the amphibole kinds, but unfortunately the larger producers – Egnep Ltd & Cape Asbestos Co. Ltd, have some large plants & probably not willing to make further changes in machinery. The smaller concerns are satisfied with hand-cobbing, which is probably cheaper in the end, milling being only profitable on a large scale. You might however try to get in touch with firms such as Dominion Asbestos, Kuruman or Warrendale Asbestos, Daniels Kuil, to the west of Kimberley. If I learn anything I shall try & let you know.

Another mineral for which there is a shortage, that will get more important in the future is soft limestone suitable for making cement, as the existing deposits are used up.

With the best of wishes to Madame Gorsky from my wife & myself.

Your sincerely

A.L. du Toit

5. Letter from V. Gorsky to A.L. du Toit, 28 September, 1947

V. Gorsky,
146 Yeo Street,
Bellevue East,
Johannesburg
28.9.1947

Dear Dr du Toit,

Many thanks for your kind and very interesting letter of the 22nd inst.

In the meantime, I got a permit for permanent residence and I am very happy indeed that all my worries in this connection are over. At last I can start to arrange our life in the country on a sure base and to take some interesting job.

I hope I will get a chance to see you sometimes on your travelling in Transvaal and in Johannesburg.

I would like to touch chrome people here as chromite is my chief "speciality" and object of work during many years.

With the best wishes and many thanks from both of us to your wife and yourself,

Sincerely yours,
V. Gorsky.

At the top of this letter, du Toit had penciled in "No reply needed". This was the end of their correspondence.

Discussion

The curricula vitae of both Vsevolod and Eugenie Gorsky are interesting documents, giving insights into the training of professionals in the field of geology, mining engineering, mineralogy and geochemistry; and revealing the peripatetic nature of life in the mining industry in pre-War Kingdom of Yugoslavia, as well as forced relocations to exotic destinations like Cyprus, Egypt, Tanganyika and South Africa during and after the War. In an overwhelmingly male-dominated field, Eugenie Gorsky provides a rare example of a female geochemist who was active in Africa, especially in the first half of the twentieth century, in countries such as Egypt, Tanganyika and South Africa. Her story is one that needs to be told, alongside that of other pioneering women in geoscience in Africa such as geologist Katharine Fowler-Billings (1902-1997; née Fowler) (Fowler-Lunn, 1938; Fowler-Billings, 1996), and palaeobotanist Dr. Edna Plumstead (1903-1989; née Janisch) (Maguire, 1990). Eugenie Gorsky was not as free in her choices as these other women,

since her career and movements were intimately connected and dependent on her husband's own career, and she followed him around the world. Nevertheless, in their peripatetic lifestyle, the Gorskys as a working professional couple were pioneers of a way of life that is now commonplace in a globalized world.

From their curricula vitae, it is possible to reconstruct the early careers of both Vsevolod and Eugenie Gorsky. Vsevolod was born in 1898 in "Proskurov, Russia". This town is located in Proskurov County, Kamenets-Podolsk District, Ukraine (just north of the Dniestr River, close to the border with Moldova), and today is called Khmelnytskyi. Proskurov was the site of a major anti-Jewish pogrom by the Nazis in 1941, and an earlier one in 1919 (Voskoboynik, 2002). In 1897 the Jewish population was 11,411, about 50 % of the population of the town (Voskoboynik, 2002). Thus it is possible (though unproven) that Vsevolod was of Jewish origin. Consistent with this possibility, it should be noted that the Gorskys' address in Johannesburg in 1947 was in Yeo Street, in Bellevue East which formed part of Yeoville, which was one of the suburbs most densely populated with immigrant Jews at that time (Mendelsohn & Shain, 2008, p. 99). This may be important, since Vsevolod and his wife Eugenie left Yugoslavia in 1938, after which it was occupied by Nazi Germany during the Second World War, and they apparently never returned there. Vsevolod left his hometown in 1917 to study at the University of "Kharkov, Russia", and then in Zagreb until 1921. The University of Kharkov (now Kharkiv) was, and remains, one of the main universities in what is now the Ukraine, with a renowned Geological Faculty (Lobenko, 2018). In 1921, at the time when Vsevolod was in Zagreb (the capital of Croatia), there was just a rudimentary department of geology at the Technical College, where a Chair of Geology and Mineralogy had been established in 1919. This was the nucleus for what eventually developed into the Faculty of Mining Geology and Petroleum Engineering at the University of Zagreb, where mining engineering studies only commenced in 1939 (Vlahović et al., 2009). Prior to that time, the only well established university department of geology and mining in the Balkans was at the Technical Faculty of the University of Ljubljana, where in 1919 a Mineralogical-Petrographical Institute (headed by Professor Karel Hinterlechner from Vienna), and an Institute for Mineral Deposits, were founded, and which were later merged in 1927 (Internet 1). In 1920 an Institute of Geology

and Palaeontology was formed in the Faculty of Arts, headed by Prof. Marijan Salopek, from Zagreb. It was to the University of Ljubljana that Vsevolod Gorsky went to further his studies in 1922.

Eugenie Gorsky (née Gvozdev) was born in 1902 at Vladikavkaz (today known as Vladikavkaz, in the Republic of North-Ossetia-Alania, Russia). This town was visited by Alex du Toit on 4th July 1937, on a field excursion to the Caucasus with the 17th International Geological Congress, which was held in Moscow (Master, 2017). At that time, Vladikavkaz was known as Ordzhonikidze. Her first name was also spelled “Eugenija” (e.g., Gorsky, 1937). Her maiden surname “Gvozdev” derives from “gvozd”- nail or peg (nickname of thin person), or someone with strong, firm character, metaphorically made of iron. Although her name is not a specifically Jewish name, it is possible (though unproven) that she may also, like Vsevolod, have had Jewish origins. A Jew with the name of Moysey Gvozdev appeared on a list of Records of Bay Area Council for Soviet Jews 1952, 1954-1999 (Gardiner & Filimonov, 1999). According to census records, in 1897 there were 1214 Jews in Vladikavkaz (2.8 % of the population), while the 2010 census revealed that about 3.1 % of the population of Vladikavkaz is Jewish (Russian Federal State Statistics Service, 2011). Eugenie was educated at a school in Armavir, which is located in the eastern part of the Russian administrative region of Krasnodarskiy Krai, along the railway line linking Vladikavkaz and Rostov on Don.

It is interesting to note that both the Gorskys, although Yugoslav nationals who studied in Slovenia, were born in far-flung regions of the Russian empire, before the formation of the Soviet Union. How and why they both ended up in Ljubljana (in what is now the Republic of Slovenia) is not known, though after the 1917 October Revolution in Russia, many Russians fled to the “Kingdom of Serbs, Croats and Slovenes”, later called the Kingdom of Yugoslavia. The fact that they were both “Yugoslav subjects” suggests that they may have been either voluntary émigrés, or refugees, fleeing from the communist USSR, who had been granted domicile in the Kingdom of Yugoslavia. Both Vsevolod and Eugenie were most likely attracted to the University of Ljubljana because of its reputation in the fields of science and engineering, and this is where they probably met. In 1926-31, Eugenie was enrolled as an undergraduate student in the Faculty of Science. During this same period, Vsevolod was finishing his

degree in Mining Engineering. It is probable that Vsevolod and Eugenie may have gotten married during that time. Their married names (given as “Vsevolod Gorskiy and Eugenija Gorskiy”) appear on a membership list of the Ljubljana Cave Research Society in 1927 (DZRJL, 2015).

Vsevolod was very productive in the late 1920's- in his CV he mentions that he had published 28 papers and articles including original research in geophysics, geochemistry, mining engineering and surveying, in Serbo-Croatian, Slovenian and Russian technical and scientific journals and magazines. A few of these articles are accessible through internet searches- they include several papers on geophysical methods and applications (Gorsky (1926a,b; 1929a,b,c), a paper on geochemistry applied to landscapes, reviewing the ideas of the Russians Vladimir Vernadsky and Alexander Fersman (Gorsky, 1927), and a paper about the Institute of Surveying of Mines and Geodesy at the University of Ljubljana (Gorsky, 1929d).

Gorsky's (1927) interest in the ideas of geochemist and philosopher Vladimir Vernadsky (1863-1945) may have been sparked by one of the most famous professors in the Geology Department of the University of Ljubljana, Vladimir Vasilievich Nikitin (1867-1942), who had corresponded with his fellow countryman Vernadsky from 1915 to 1930 (Brenčič, 2018). Professor Nikitin had also had a notable formative influence on Eugenie Gorsky, who asserted in her CV that she had “expert knowledge in mineralogy, petrology and especially in the use of Fedorov universal method”. Nikitin (1936) was world-renowned for his use of the method pioneered by Russian mineralogist Evgraf Fedorov (1853-1919), which utilized a Universal Stage mounted on a petrographic microscope to study the optical indicatrix to determine the composition of feldspar (Duhovnik, 1953). As a Russian émigré, Nikitin clearly influenced the Russian émigré couple of Vsevolod and Eugenie Gorsky. After graduating as a Mining Engineer, Vsevolod was hired by the Mining Department as Assistant Professor of Mine Surveying and Geophysical Prospecting from 1926 to 1929, after which he was replaced by another immigrant from the Russian Empire (Nagorno Karabakh), Dimitry Arshakovich Chahnazaroff (Mihael Brenčič, written comm., 2020), who soon emigrated to South America (Tchoumatchenco et al., 2018). Russian immigrants among the Faculty and students of the University of Ljubljana played an important role in broadening the internationalization of teach-

ing and research, and in maintaining strong links with renowned researchers in Russia.

While Eugenie was still completing her degree, both she and Vsevolod started working at the chrome mines near Skoplje. Skoplje is the former (Serbo-Croat) spelling of the name of the capital of North Macedonia, which is today called Skopje. Vsevolod worked at Allatini mines near Skopje as Mine Superintendent and Assistant Technical Director from 1929-32, and then was at the Chromasseo Mines as General Superintendent and Technical Director, from 1932 to 1938. During this time, Eugenie worked in the assay laboratories at both Allatini and Chromasseo mines from 1931-1933. In 1938, in response to a worsening political and economic situation, and perhaps sensing the gathering clouds of war, the Gorskys left Yugoslavia for Cyprus, to work for the British firm Selection Trust, which owned chromite mines there. Selection Trust also owned the largest lead-zinc mines in Yugoslavia, at Trepča (Wright & McCroskey, 1944), where Vsevolod had worked before.

The Gorskys' move to Cyprus was vindicated by subsequent events which unfolded in Yugoslavia during the Second World War. The Chromasseo (or "Asseo") mines, which had been owned by the Jewish family of its late founder Moses Asseo, were confiscated in 1941 by the invading Germans and taken over by a company called Yugochem, which was 50 % owned by a subsidiary of the German Krupp conglomerate called Deutsch-Bulgarische Chromerzbergbau A.G. (War Department, 1944), and 50 % owned by the Hermann Goering Works (US Military Tribunal Nuremberg, 1948). Later in 1941 the Krupp conglomerate obtained full control over these mines (War Department, 1944). The Allatini Mines, which are situated at Orasje, 24 km NW of Skopje, had been opened with British capital in 1928 (Wright, 1939), but also came under German control during the war (Hehn, 2005).

The Gorskys in Cyprus worked at the chrome mines in the ultrabasic Troodos Massif in the centre of the country (Henckmann, 1941). After four years in Cyprus, working on the chrome mines, Vsevolod became the country representative for Selection Trust. Eugenie had worked from 1938 to 1941 in the Drawing Office of Cyprus Chrome Company at Troodos, then from 1941-1942 she worked in the Assay Laboratories of the company at Ayios Nikolaus.

In 1943 Vsevolod was transferred to Selection Trust's operations in Alexandria, Egypt, where he relocated with Eugenie. He worked there at

the Wolfram (Tungsten) Concentrating Plant where rare metal concentrates were produced, from ores derived from pegmatites in the Neoproterozoic basement complex. Eugenie worked in the Assay Laboratory of the Concentrating Plant from March to July 1943.

Later in 1943, the Gorskys moved to Cairo, where Vsevolod worked as a metallurgical consultant for lead, zinc and other ores for the Egyptian Metal Refining Company, and for Anglo-Egyptian Chemical Industries, on their tin and rare metal (Ta-Nb) deposits associated with greisenised and albitised pockets and pegmatites in granites at Um Ghaig and El Egly Mines, situated in the Red Sea Hills south of Quseir (Abouzeid & Khalid, 2011). Eugenie worked as an Assayer for Um Gheig Mines at their Cairo laboratory, from December 1943 to November 1944. While they were in Cairo, both the Gorskys enrolled for special wartime service for the Yugoslav Red Cross Society, and Vsevolod also served as a Liaison Officer with the Middle East Relief and Refugee Administration, British Minister of State Office in Cairo. They contributed to the long history of medical cooperation between the British and Yugoslavs in both peace and war (Löwenthal, 1961).

In 1945, the Gorskys moved again, this time to Selection Trust's Uruwira Minerals operations in Tanganyika (now Tanzania), East Africa. In the Uruwira mineral field (Stockley, 1939), a rich gold-copper deposit was discovered at Mpanda in 1939 (de la Vallée Poussin, 1939). This Proterozoic polymetallic (Cu-Au-Pb-Ag) vein-type deposit in the Ubendian Belt was mined well into the 1980s (Nanyaro, 1989). From February 1945 to March 1946, Vsevolod worked as an Underground Manager at the Mpanda mine, while Eugenie worked as Assayer in Charge of the Assay Laboratory of Uruwira Minerals Limited at Mpanda. Later in 1946, the Gorskys moved again, this time to Dodoma, where Vsevolod was Temporary Metallurgist at the Geological Division, Department of Lands and Mines, of Tanganyika Territory.

At the time of his correspondence with Alex du Toit in September 1947, Vsevolod Gorsky had arrived in South Africa with Eugenie not long before, since they were still in the process of applying for residence permits. They had probably arrived by steamer from Dar-es-Salaam, and disembarked either in Lourenço Marques, Portuguese East Africa (now Maputo, Mozambique), or Durban, South Africa, and then travelled by train to Johannesburg and Cape Town.

Aside from the biographical information revealed in their *curricula vitae*, not much is known about the subsequent careers of the Gorskys. In his last letter to du Toit dated 28 September 1947, from Johannesburg, Vsevolod revealed that he had managed to obtain permanent residence permits, and was looking forward to working in the minerals industry in South Africa. However, it has not yet been determined how long the Gorskys spent in South Africa, and where they spent the decade of the Fifties. In the 1960s and 1970s, they were living and working in Brazil, and they produced a number of mainly unpublished joint reports for the Brazilian National Commission for Nuclear Energy (Gorsky & Gorsky, 1962, 1966, 1972, 1974). No information has yet been found about the fate of the Gorskys, but at the time of their last known report (Gorsky & Gorsky, 1974), Vsevolod was 76 years old and Eugenie was 72, both long past retirement age. After having spent at least a dozen years there, it is likely that they ended their nomadic careers and retired in Brazil, and may have died there.

In today's globalized era, many professional couples roam the world as expatriates, having given up their homes in their countries of origin, to become roaming "free agents". The case of Vsevolod and Eugenie Gorsky shows that this was happening in the first half of the Twentieth Century, when the driving force for their peripatetic existence was not just professional and financial advancement, but also imperatives forced on them by circumstances of revolution, war, and social upheaval, following the Russian Revolution and the Second World War. As a professional couple active in geosciences in Africa, they led the way in their field. Eugenie, as a female analytical chemist working in the mining industry in several European and African countries, was also a pioneer in what was then, and still is, a male-dominated profession. Like many other émigré geoscientists of Russian origin who ended up in Latin America (Tchoumatchenco et al., 2018), the Gorskys spent the final years of their careers in Brazil.

Acknowledgments

I am indebted to Clive Kirkwood, Librarian at the Jagger Library, University of Cape Town, for access to the du Toit Archives, and for permission to publish this paper. I am grateful to Bernarda Bole for additional information, and for reviews from an anonymous reviewer and especially from Mihael Brenčič in Ljubljana, who provided much appreciated historic and etymological information. I thank Claudia Braude (Cape Town) for discussions.

References

- Abouzeid, A.-Z.M. & Khalid, A.-Z.M. 2011: Mineral Industry in Egypt- Part I: Metallic Mineral Commodities. *Natural Resources*, 2: 35-53.
- Alex du Toit Papers. File BC 722, B1 General Correspondence (1930's-1940's). Jagger Library, Univ. of Cape Town, Cape Town, South Africa.
- Brenčič, M. 2018: Correspondence between Vasily Vasilyevich Nikitin and Vladimir Ivanovich Vernadsky. *Geologija*, 61/2: 229-238. <https://doi.org/10.5474/geologija.2018.016>
- de la Vallée Poussin, J. 1939: Découverte d'un nouveau gisement cupro-aurifère de Tanganyika Territory. *Bull. Acad. R. Belg., Cl. Sci.*, 25: 279-288.
- Duhovnik, J. 1953: Vasilij Vasiljevič Nikitin – in memoriam. *Geologija*, 1: 5-10.
- du Toit, A.L. 1927: A geological comparison of South America and South Africa. *Publications of the Carnegie Institution of Washington*, Washington, D.C., 381: 1-158.
- du Toit, A.L. 1937: *Our Wandering Continents: a Hypothesis of Continental Drifting*. Oliver & Boyd, Edinburgh: 366 p.
- du Toit, A.L. 1939: *Geology of South Africa*. 2nd edition. Oliver & Boyd, Edinburgh: 539 p.
- du Toit, A.L. 1945: The origin of the amphibole asbestos deposits of South Africa. *Trans. Geol. Soc. S. Afr.*, 48: 161-206.
- DZRJL 2015: DZJRL Members 1910-2010. Društvo za raziskovanje jam Ljubljana (Ljubljana Cave Research Society). Internet: <https://www.dzrjl.si/en/dzrjl-members-1910-2010/>.
- Fowler-Billings, K. 1996: *Stepping-Stones: The Reminiscences of a Woman Geologist in the Twentieth Century*. *Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Sciences*, New Haven, CT, 53: 224 p.
- Fowler-Lunn, K. 1938: *The Gold Missus: A Woman Prospector in Sierra Leone*. Allen & Unwin, London: 303 p.
- Gardiner, H.N. & Filimonov, A. 1999: *Guide to the Records of Bay Area Council for Soviet Jews and Bay Area Council for Jewish Rescue and Renewal* undated, 1952, 1954-1999, I-505, I-505A. Center for Jewish History, American Jewish Historical Society, New York, NY. Internet: <http://digifindingaids.cjh.org/?pID=365617>
- Gorsky, E. 1937: Petrography of the Mine Čašak near Skoplje (Summary in German: *Zur Charakteristik der Eruptivgesteine in der Umgebung des Bergwerkes Čašak bei Skoplje*).

- Bull. Serv. Géol. Royaume de Yougoslavie, Beograd, 5.
- Gorsky, E. & Gorsky, V.A. 1966: Quartzitos com cheralita da Serra de Itiúba, Bahia. XX Congresso Brasileiro de Geologia em Vitória-SBG. Núcleo de Rio de Janeiro. Resumos das Comunicações, Publ. Nf 1: 108-109.
- Gorsky, E. & Gorsky, V.A. 1972: A Mineralização Vanadífera em Tucano, Bahia. Congresso Brasileiro de Geologia, XXVI, SBG, Belém, 1972. Resumo das Comunicações. Sessões Técnicas. Bol., 1: p. 46.
- Gorsky, V. 1926a: A critical review of different electrical methods of prospecting and a laboratory study of one of these methods (in Slovenian). Institute of the Surveying of Mines, University of Ljubljana, Yugoslavia. Abstract in English in: Lee, F.W. (Compiler), U.S. Bureau of Mines Inf. Circ. 6287, Geophys. Abstr., XVII, 1930, p. 26.
- Gorsky, V. 1926b: The importance of applied geophysics for the mining industry (in Slovenian). Institute of the Surveying of Mines, University of Ljubljana, Yugoslavia. Abstr. in English in: Lee, F.W. (Compiler), U.S. Bureau of Mines Inf. Circ. 6287, Geophys. Abstr., XVII, 1930, p.18.
- Gorsky, V. 1927: Geokemija in kemijsko geografsko proučevanje pokrajine. Geografski Vestnik, 3: 112-131. zgs.zrc-sazu.si/Portals/8/Geografski_vestnik/2_Pred1999/GV_0301_112_131.pdf
- Gorsky, V. 1929a: Geophysical investigation of bauxites in Yugoslavia (in Serbian). Rudarski i Topionicski Vesnik (Bulletin of Mining and Metallurgical Industry), Belgrade, 8, 350-358. Abstr. in English in: Lee, F.W. (Compiler), U.S. Bureau of Mines Inf. Circ. 6287, Geophys. Abstr., VII, p. 24.
- Gorsky, V. 1929b: Scientific importance of applied geophysics. Transactions of the Fourth Meeting of Russian Academic Organizations Abroad, 1929, 85-91. Abstr. in English in: Lee, F.W. (Compiler), U.S. Bureau of Mines Inf. Circ. 6287, Geophys. Abstr., VIII, p. 34.
- Gorsky, V. 1929c: Applied geophysics- a new conquest of the mining industry (in Slovenian). Rudarski i Topionicski Vesnik (Bulletin of Mining and Metallurgical Industry), Belgrade, 1(4), 160-167. Abstr. in English in: Lee, F.W. (Compiler), U.S. Bureau of Mines Inf. Circ. 6287, Geophys. Abstr., XII, 1930: 20-21.
- Gorsky, V. 1929d: The Institute of Surveying of Mines and Geodesy at the University of Ljubljana (in Slovenian). Rudarski i Topionicski Vesnik (Bulletin of Mining and Metallurgical Industry), Belgrade, 1(9), 394-403. Abstr. in English in: Lee, F.W. (Compiler), U.S. Bureau of Mines Inf. Circ. 6287, Geophys. Abstr., XII, 1930: p. 21.
- Gorsky, V.A. & Gorsky, E. 1962: Further contribution to the study of uranium bearing auriferous metaconglomerate of Jacobina, State of Bahia, Brazil. Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), Brasil-4th Interamerican Symposium on the Peaceful Applications of Nuclear Energy, 9-13 April 1962, Mexico, 1: 301-312.
- Gorsky, V.A. & Gorsky, E. 1974: Contribuição à mineralogia e petrografia do planalto de Poços de Caldas. Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), Boletim, 13: 93 p.
- Hehn, P.A. 2005: A Low, Dishonest Decade: The Great Powers, Eastern Europe, and the Economic Origins of World War II, 1930-1941. The Continuum Publishing Group, New York, USA and London, UK: 498 p.
- Henckmann, W. 1941: Geologie und Lagerstätten der Insel Cypren. Zeitschrift für praktische Geologie, 49/7-9: 75-84, 89-97, 107-110.
- Lobenko S. 2018: Forming and development of the geological scientific school of the imperial Kharkov university (the second half of the XIX – beginning of XX century). History of Science and Biographical Studies, 3, Article No. 23: 314-327. (In Ukrainian, with English Abstract).
- Löwenthal, Z. 1961: Anglo-Yugoslav medical relations in peace and war. British Medical Journal, 16 December 1961, 2: 1634-1637.
- Master, S. 2017: South African geologist Alex L. du Toit, pioneer of continental drift, in the Caucasus (17th IGC, July, 1937): diaries and photographs of an excursion. In: Abstracts Volume, 42nd INHIGEO Symposium, Yerevan, Armenia, 12-18 September 2017, p. 156.
- Maguire, J.M. 1990: Dr Edna P. Plumstead FRSSAf. Trans. Roy. Soc. S. Afr., 47/3: 355-357. doi: <https://doi.org/10.1080/00359199009520247>
- Mendelsohn, R. & Shain, M. 2008: The Jews in South Africa: An illustrated history. Jonathan Ball, Johannesburg and Cape Town: 234 p.
- Nanyaro, J.T. 1989: Proterozoic gold-base metal veins in the Mpanda mineral field, western Tanzania. Ann. Mus. Roy. Afr. Centr., Tervuren, Belgium, Sci. Géol., 97: 144 p.
- Nikitin, W. 1936: Die Fedorow-Methode. Borntraeger, Berlin: 109 p.
- Russian Federal State Statistics Service 2011: Всероссийская перепись населения 2010 года. Том 1 [2010 All-Russian Population Census,

- vol. 1, in Russian]. Federal State Statistics Service, Moscow, Russia.
- Sagui, C.L. 1925: Asbestos deposits of Cyprus. *Econ. Geol.*, 20: 371-375.
- Stockley, G.M. 1939: An outline of the geology of the Uruwira Mineral Field. *Geol. Surv. Tanganyika*, Short Paper 22.
- Tchoumatchenco, P., Riccardi, A., Durand Delga, M., Alonso, R., Wiazemsky, M., Boltovskoy, D., Charrier, R. & Minina, E. 2018: Geologists of Russian origin in Latin America. *Revista del Museo de La Plata*, 3/2: 223-295.
- US Military Tribunal Nuremberg 1948: Chomasseo Mines, Yugoslavia. In: KRUPP et al., so-called KRUPP Trial, US Military Tribunal Nuremberg, Judgment of 31 July 1948, 113-118. <http://werle.rewi.hu-berlin.de/KRUPP-Case%20Judgment.pdf>
- Vlahović, I., Vrkljan, M., Dudjak, D., Garapić, M., Golub, M., Kapor, F. & Salopek, B. (eds.) 2009: First 90 years of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering of University of Zagreb (in Croatian). Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Voskoboinik, D. 2002: History of the Jews of Proskurov, Ukraine. Thesis, History Department, Union College, Schenectady, N.Y.
- War Department 1944: German economic penetration and exploitation of Southeastern Europe. Civil Affairs Information Guide, United States War Department, Washington D.C., 19 July 1944, Pamphlet No. 31-127: 26 p.
- Wright, C.W. 1939: The Iron and Steel Industries of Europe. U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, Washington, D.C., Economic Paper 19: 1-98.
- Wright, C.W. & McCroskey, B.B. 1944: Mineral Resources of Yugoslavia. In: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, Washington, D.C., Foreign Minerals Survey, 1/6: 1-24.
- Internet source:
 Internet 1: History of the Geology Department. Faculty of Natural Sciences and Engineering, University of Ljubljana. <https://www.ntf.uni-lj.si/history> (10-08-2020)

Nove knjige

Mihael BRENČIČ, 2019: **Ljubljanska geološka šola: zgodovina poučevanja geologije na Univerzi v Ljubljani.**
UL, NTF, Ljubljana: 318 str.

Stoletnica Univerze v Ljubljani, ki jo slavimo v letu 2019/20, je odlična priložnost, da se v zgodovino delovanja ozrejo tudi posamezne stroke. To vsekakor velja tudi za geologijo, saj so se geološke vsebine na ljubljanski univerzi predavale od samega začetka dalje. Oddelek za geologijo se zato upravičeno prišteva med ustanovitelje ljubljanske univerze.

Avtor knjige Ljubljanska geološka šola, s podnaslovom Zgodovina poučevanja geologije na ljubljanski univerzi, izr. prof. dr. Mihael Brenčič, dipl. inž. geol., se je lotil zahtevne naloge. Zahtevne predvsem zato, ker do danes takšnega pregleda nismo imeli niti za krajše časovno obdobje. Veliko arhivskega materiala, ki bi omogočil boljši vpogled, je neobstoječega ali neznanega. Avtor je moral v različnih arhivih in virih poiskati ustrezne informacije, jih preveriti in povezati v smiselno celoto. Dela ni usmeril le strogo v zgodovino Oddelka za geologijo, temveč je poiskal širši zgodovinski kontekst prisotnosti geološke stroke v pedagoškem procesu na različnih stopnjah, različnih inštitucijah in za potrebe različnih strok.

Delo, ki obsega kar 318 strani, je razdeljeno v devet vsebinskih poglavij, z več podpoglavji. V Uvodu avtor pojasni izhodišča in namen dela. V prvem poglavju, Razvoj poučevanja geologije v Sloveniji, se dotakne tako učbenikov kot pouka geologije v splošnih in specializiranih šolah. Izredno pomembni sta poglavji Razvoj Univerze v Ljubljani in Razvoj matičnih fakultet študija geologije. Geologija se je prvotno namreč poučevala na dveh različnih fakultetah – Filozofski in Tehniški. Šele leta 1960 se je študij združil na Fakulteti za naravoslovje in tehnologijo in po njenem razpadu ostal na Naravoslovnotehniški fakulteti. Sedanja NTF je predstavljena z vsemi svojimi sestavnimi deli, kar je zagotovo pomemben zapis tudi za ostale oddelke, ki delujejo na fakulteti. V nadaljevanju se avtor osredotoči na Organizacijski razvoj Oddelek za geologijo. Poleg organizacijske sheme je še posebej zanimiv vpogled v strokovno-raziskovalno delo, ki je potekalo v okviru Istituta za geologijo. Lepo je osvetljen razvoj in pomen zbirk, ki so nastale in se dopolnjevale od začetkov do danes, ko so združene v

skupnih prostorih v stavbi Montanistike in predstavljajo neprecenljivo dediščino in nepogrešljiv učni pripomoček.

Sledi poglavje, namenjeno pregledu in Razvoju študijskega programa geologije. Avtor ne poda le dejstev, ampak skuša osvetliti razmere in razloge, ki so do sprememb študijskih programov privedle. Dotakne se tudi splošnih predmetov, ki so osnova za nadgradnjo geološkega znanja, ter matičnosti, ki je danes kar preveč zanemarjena. Izredno zanimiva je predstavitev študija v luči statističnih podatkov, ki so hkrati odsev razvoja in delovanja celotne družbe. Pomemben del vsakega študija so tudi Obštudijske dejavnosti, ki združujejo študente in profesorje tudi v bolj neformalnih okoliščinah. Tako so predstavljena študentska gibanja, Skok čez kožo, Slovensko geološko društvo in organizacije študentov geologije.



Zgodovina poučevanja geologije
na Univerzi v Ljubljani

V poglavju Življenjepisi je avtor predstavil vse učitelje, ki so na ljubljanski univerzi poučevali geologijo. Pri tem je zaradi objektivnosti zapisa opisal le tiste, ki sodijo v zgodovinski čas. Kljub temu je seznam dolg kar 23 imen, od prvega rednega predavatelja, prof. dr. Karla Hinterlechnerja, do zadnjega, akad. prof. dr. Maria Pleničarja. Med njimi je kar nekaj tujcev, predvsem iz ruskega govornega območja in iz sosednjih slovanskih republik, ter dve profesorici.

Delo zaključujejo poglavja Sklep, Zahvale in Opombe, kjer avtor na kratko povzame razvoj in pomen poučevanja geologije v Sloveniji, se zahvali vsem, ki so tako ali drugače pomagali pri delu ter navede opombe, na katere se je v besedilu skliceval.

Uvod v spisek uporabljene literature so pojasnila glede metodologije iskanja, navajanja in preverjanja virov. Iz obsežnega seznama in ra-

znolikosti virov je razvidno, kako temeljito in obširno delo je Mihael Brenčič opravil. Brez njegovega nagnjenja do zgodovine in raziskovalne žilice, delo zagotovo ne bi bilo tako dobro utemeljeno. Delo zaključujeta Imensko kazalo in kratak povzetek v angleškem jeziku, ki tudi tujemu bralcu omogoči vsaj delen vpogled v zgodovino razvoja slovenske geološke šole. Posebna popestritev knjige je slikovno gradivo, ki bi brez te publikacije še vedno ostalo raztreseno, in morda tudi izgubljeno, po najrazličnejših kotih in predalih.

Pričujoča knjiga ni le zbirni dokument zgodovine poučevanja geologije, temveč je po zaslugi lepega jezika in spretnega izražanja avtorja, tudi prijetno branje za vse, tudi tiste, ki niso neposredno povezani z geologijo ali univerzo v Ljubljani. Odkriva nam zanimivo in pomembno dediščino, ki tako ne bo utonila v pozabo.

Nina Zupančič

Poročila

Diorama karbonskega gozda v rudniku Sitarjevec

Blaž ZARNIK

Občina Litija, Jerebova ulica 14, SI-1270 Litija; e-mail: blaz.zarnik@litija.si

Od letošnje jeseni je v izvoznem rovu opuščena rudnika Sitarjevec v Litiji na ogled diorama, ki na zanimiv in umetniško izviren način prikazuje življenjsko okolje tropskega močvirnega gozda izpred več kot 300 milijonov let. Za njeno izdelavo je bil izbran akademski kipar Anže Jurkovšek, ki mu je geološka problematika dobro znana, saj se je s podobnimi kiparskimi objekti že večkrat predstavil, med drugim v okviru razstave Zgoščevanje v Mestni galeriji Ljubljana in s kiparsko instalacijo Karbonski gozd v Veselovem vrtu Galerije slovenskih likovnih umetnikov.

Kipar je v prostor napol zasutega rudniškega rova postavil skulpture debel karbonskih luskavcev (*Lepidodendron*), pečatnikovcev (*Sigillaria*) in velikih presličevk (*Calamites*) ter jih mojstrsko vklopil med polomljeno rudniško oporje. Kljub vernemu posnetku strukturiranosti stebel rastlinskih vrst, kakršne so paleontologi našli tudi v kamninah bližnje okolice rudnika, kipar pri izdelavi diorame ni upodobil zelenih listnih delov rastlin, saj jim je prav zaradi rudniškega okolja želel pustiti pridih fosilnosti. Za tovrstni pristop se je odločil na podlagi dobro znanih najdb v karbonskih premogovnih plasteh, v katerih so odkopali fosilna rastlinska debela v življenjskem

položaju. Ta so segala od tal do stropa rudniških rogov, podobno kot rudniško oporje.

Poleg diskretne osvetlitve, ki še poudarja strukturiranost drevesnih debel, prispevata k pravilčnosti diorame upodobitvi velike stonoge, ki se plazi preko padlih trohnečih tramov in predstavnika orjaških kačjih pastirjev (*Meganeura*), ki so lahko v karbonski periodi merili preko kril do 80 cm.

Vsekakor gre za zanimivo in nenavadno dioramo, ki želi obiskovalcu rudnika razložiti, da vstopa v svet starega zemeljskega veka, v čas, ko so v obsežni rečni delti blizu ekvatorja, tedaj ene same velike nadceline Pangea, nastajale tudi orudene kamnine Sitarjevca.

Omenjene aktivnosti vodi Občina Litija v sodelovanju z ZAG – Zavod za gradbeništvo, ki sta partnerja v evropskem projektu MINE TOUR v okviru Programa sodelovanja Interreg V-A Slovenija – Hrvaška 2014 – 2020, ki je zagotovil finančna sredstva za izvedbo del.

Projekt je v zaključni fazi. Dodatno se bo za obiskovalce odprlo 300 m rudniških rogov, kjer bo možen ogled edinstvenih limonitnih kapnikov. Prav tako bodo prenovljene zbirke in vstopni portal v rudnik.



Sl. Diorama karbonskega gozda v izvoznem rovu rudnika Sitarjevec v Litiji. Foto: Blaž Zarnik

Poročilo o aktivnostih Slovenskega geološkega društva v letu 2019

Branka BRAČIČ ŽELEZNIK

JPVOKA SNAGA d.o.o., Vodovodna cesta 90, SI-1000 Ljubljana; e-mail: branka.bracic.zeleznik@vokasnaga.si

Strokovnjaki geološke stroke in ljubitelji geologije se že 69 let družimo v Slovenskem geološkem društvu (SGD). Temeljni cilj društva je napredek znanosti in prakse na področju vseh vej geologije ter promocija geološke znanosti v družbi.

Skozi vsa leta društvo deluje v skladu z določili statuta in s programom dela, ki je sprejet na sejah IO društva v vsakem koledarskem letu. V letu 2019 je bil program sprejet na seji razširjenega Izvršnega odbora društva 20. marca. Večina postavk zastavljenega programa je bila realizirana.

Najave in poročila o društvenih aktivnostih redno objavljamo na spletni strani <https://www.slovenskogeoloskodrustvo.si/>.

Strokovna predavanja

Prof. dr. Báalazs Székely (Univerza Eötvös Loránd v Budimpešti), »Attempts to integrate David with Goliath: lessons learnt on differential uplift in a flatland«, 14. marec 2017 ob 17. uri v Ljubljani na Oddelku za geologijo NTF, Privoz 11.

Mag. Matija Križnar (Prirodoslovni muzej Slovenije), »Geološko-naravoslovni sprehod po Maskarenskih otokih« 20. marec 2019 ob 18.30 uri v Ljubljani na Geološkem zavodu Slovenije, Dimičeva ul. 14, v veliki dvorani v VI. nadstropju.

Prof. dr. Alfreda Uchmana (Jagiellonian University) »Globokomorski sledni fosili – vpogled v skrito paleookolje / Deep sea trace fossils – insight into hidden paleoenvironment«, 28. marec 2019 ob 17. uri v Ljubljani na Oddelku za geologijo NTF, Aškerčeva 12, v predavalnici 209.

Dr. Blaž Miklavič (Oddelek za geologijo, NTF), »Bo dovolj vode za vse? Študija o zalogah pitne vode v spreminjajočih se klimatskih razmerah na mikronezijskem otoku«, 18. april 2019 ob 17. uri v Ljubljani na Oddelku za geologijo NTF, Aškerčeva 12, v predavalnici 209.

Dr. Polona Kralj (Geološki zavod Slovenija) in Tanja Lukežič (Zavod RS za varstvo narave, OE Nova gorica), »Vulkanske kamnine Stropnika«, 25. april 2019 ob 17. uri v Ljubljani na Oddelku za geologijo NTF, Aškerčeva 12, v predavalnici 209.

Dr. Mateje Gosar (Geološki zavod Slovenija)»-Geokemično ozadje in zgornja meja naravne variabilnosti kemičnih elementov v tleh Slovenije« 29. maj 2019 ob 17. uri v Ljubljani na Oddelku za geologijo NTF, Aškerčeva 12, v predavalnici 209.

Dr. Carlos Martinez Perez (University of Valencia) »Conodont element function; New data from the exceptional Middle Triassic Slovenian fossil record«, 27. junij 2019 ob 17. uri v Ljubljani na Oddelku za geologijo NTF, Aškerčeva 12, v predavalnici 210.



Ivan Rakovec

Sl. 1. Prof. Ivan Rakovec (foto: M. Križnar)



Sl. 2. Dr. Katica Drobne obuja spomine na svojega profesorja (foto: M. Križnar)

Izmed predavanj, organiziranih v letu 2019, bi izpostavili predavanje v počastitev 120 let rojstva prof. dr. Ivana Rakovca, geologa in paleontologa, ki je bilo 19. septembra 2019 v Prirodoslovnem muzeju Slovenije. Pripravil ga je mag. Matija Križnar v sodelovanju z dr. Katico Drobne in dr. Dragico Turnšek, ki sta bili njegovi učenki in sodelavki. V okviru obletnice in priprav na predavanje je bilo čez celo leto opravljeno iskanje, zbiranje in dokumentiranje arhivskega gradiva posvečenega ter povezanega z Ivanom Rakovcem. Zbrano arhivsko gradivo je bilo pridobljeno s strani zasebnih donatorjev, Paleontološkega inštituta Ivan Rakovec (ZRC SAZU), Slovenske akademije znanosti in umetnosti (SAZU) ter Prirodoslovnega muzeja Slovenije. Izbrano arhivsko gradivo je bilo tudi delno digitalizirano, medtem ko je v fizični obliki sedaj shranjeno v arhivu kustodiata za geologijo Prirodoslovnega muzeja Slovenije.

Dr. Saška McGrath (South West Bournemouth Water) »Oskrba z vodo in okoljska problematika v SW Angliji« 2. oktober 2019 ob 17. uri v Ljubljani na Oddelku za geologijo NTF, Aškerčeva 12, v predavalnici 209.

Strokovna posvetovanja, seminarji in okrogle mize

SGD je v sodelovanju z Geološkim zavodom Slovenija in Prirodoslovnim muzejem Slovenije sodelovalo pri izvedbi mednarodnega 7th Symposium on Mesozoic and Cenozoic Decapod Crustaceans, ki je bil od 17. do 21. junija 2019 v Ljubljani. Simpozija se je udeležilo 44 raziskovalcev iz 17 držav. Udeleženci so v prvih dveh dneh simpozija v predavanjih ali posterjih predstavili svoje raziskovalno delo. Sledila sta dva terenska dneva, kjer so bila predstavljena nekatera najdišča fosilnih rakov v Sloveniji. Povzetki srečanja in prispevki so objavljeni v reviji *Geologija* (63/1).



Sl. 3. Udeleženci 7. simpozija o mezozojskih rakih deseternožcih na Trnovskem gozdu (foto: M. Križnar)

V sodelovanju z Geološkim zavodom Slovenija in Evropskim združenjem za geokemijo (European Association of Geochemistry – EAG) je bilo 27. novembra 2019 na Geološkem zavodu Slovenije organizirano predavanje prof. dr. Karen Hudson Edwards (Univerza Exeter). Predavanje je obravnavalo tematiko rudarskih odpadkov, geokemične procese, ki se v njih dogajajo ter njihove vplive na okolje in zdravje prebivalcev.

V sodelovanju z Oddelkom za geologijo NTF je bilo 29. novembra 2019 na Aškerčevi 12 organizirano 24. posvetovanje slovenskih geologov, kjer so bile predstavljene nekatere aktivnosti članov SGD (Prenova slovenske geološke poti, Geološke zgodbe stavbe Montanistika, Strokovne geološke podlage za muzej narave Bele krajine)

Aktivnosti za promocijo geologije

V letu 2019 so bile izvedene številne delavnice za promocijo geološke znanosti, s katerimi želimo prikazati različne možnosti oz. pristope k podajanju geoloških vsebin s pomembnim poudarkom na uporabnosti v vsakdanjem življenju.

Na 47. mednarodnih dnevih mineralov, fosilov in okolja MINFOS 11. in 12. maja 2019 v Trzinu smo sodelovali z razstavo 100 let poučevanja geologije na Univerzi v Ljubljani in delavnico Učimo se geologije. Sodelovanje je potekalo z Oddelkom za geologijo NTF in GeoZS. Na dogodku je Slovensko geološko društvo prejelo pohvalo o sodelovanju.

Z delavnico KamenCheck – lov za geološkimi zakladi smo sodelovali na prireditvi Vrt eksperimentov v okviru 11. Znanstivala 1. in 2. junija 2019. Obiskovalci so preko igre (geolov) reševali geološke izzive. Pri tem so si pomagali z aplikacijo KamenCheck in preiskovalnim geološkim kompletom. Spoznavali so različne kamnine, minerale in njihovo uporabo v vsakdanjem življenju.



Sl. 4. Morska lilija (foto: M. Križnar)

Na EGU kongresu, ki je bil v aprilu 2019 na Dunaju, je bil uspešno predstavljen koncept Dneva geologije. Ideja je bila predstavljena v predavanju z naslovom »Geology every day! – an example of educational workshop to teach the geology«

V sklopu konference Hidden geography in Iliščevih dnevov (avgust 2019) smo predstavili rezultate analiz učnih načrtov in učbenikov. Pripravljen je bil prispevek z naslovom »Geology revealed - geological contents in Slovenian curriculum and textbooks«. Izvedena je bila tudi delavnica, kjer smo predstavili različne pristope uporabe aplikacije KamenCheck.

V okviru Sekcije za promocijo geoloških znanosti je bil pripravljen osnutek sprememb in dopolnitev geoloških vsebin v učnih načrtih osnovnih in srednjih šol. Pripravljeni in posredovani so bili: Poziv k ureditvi poučevanja geoloških vsebin v osnovni in srednji šoli ter Poziv k sodelovanju z geološko stroko pri strokovnem pregledu geoloških učnih vsebin v učbenikih.

GeoTEK

Slovensko geološko društvo je 12. oktobra 2019 organiziralo četrti tradicionalni GeoTEK, tokrat na območju nekdanjega rudnika Sitarjevec v Litiji. Udeležilo se ga je 30 članov SGD in simpatizerjev geologije. Tekači so se spopadli s 5 km tekaško traso, pohodniki pa so se od ploščadi počasi odpravili do bližnjega oddajnika nad mestom Litija. Po poti so šli mimo dveh odprtih rudniških rovov. Za strokovno razlago po poti so poskrbeli Miha Dobravec (vodil po muzejskem delu rudnika in študent geologije), Mateja Gosar in Valentina Pezdir (Geološki zavod Slovenije), svoje pa so dodali tudi sami udeleženci, ki so se tekom svoje poklicne poti srečali z geološko problematiko rudnika Sitarjevec in bližnje okolice. Pohodniki so izvedeli nekaj o pomenu in zgodovini rudnika, o nastanku orudjenja in mineralni paragenezi ter okoljskih izzivih, ki jih predstavlja rudnik danes.

Mednarodno delovanje SGD in članstvo v tujih in domačih zvezah

SGD je včlanjeno v tuje zveze: European Federation of Geologists (EFG), International Union for Quaternary Research (INQUA), European Association for the Conservation of the Geological Heritage (ProGeo), European Mineralogical Union (EMU) in International Mineral Association (IMA) in tudi v Slovensko inženirsko zvezo (SIZ).

Član SGD Marko Komac je bil novembra 2018 izvoljen za predsednika EFG, 24 naših članov pa sodeluje v strokovnih svetovalnih telesih EFG.

Kot član Evropskega združenja geologov (European Federation of Geologists – EFG) SGD od leta 2015 sodeluje v evropskih projektih Obzorje 2020 (Horizon 2020). Skupaj z več drugimi nacionalnimi geološkimi društvi sodelujemo kot neodvisni partner preko pogodbe z EFG kot vodilnim projektnim partnerjem. V letu 2019 smo uspešno zaključili aktivnosti v projektih UNEXMIN – Podvodni raziskovalec potopljenih rudnikov (*An Autonomous Underwater Explorer for Flooded Mines*) in CHPM 2030 – Soproizvodnja toplotne in električne energije ter pridobivanje kovin (*Combined Heat, Power and Metal extraction from ultra-deep ore bodies*). Nadaljujejo se aktivnosti v projektu INFAC – Inovativna, neinvanzivna in popolnoma sprejemljiva tehnologija raziskovanja (*Innovative, Non-Invasive and Fully Acceptable Exploration Technologies*). V letu 2019 smo začeli z delom v projektih ROBOMINERS (*Resilient Bio-inspired Modular Robotic Miner*), v projektu REFLECT (*Redefining geothermal fluid properties as extreme conditions to optimize future geothermal energy extraction*), v projektu ENGIE (*Encouraging Girls to Study Geosciences*) in v projektu CROWD THERMAL (*Community based development schemes for geothermal energy*).

SGD je tudi član Slovenske inženirske zveze – SIZ. S tem je izpolnjen pogoj o obveznem članstvu SGD v SIZ za pridobitev naziva Evro inženir (EUR ING).

Geološki izleti in ekskurzije

Dvodnevna strokovna ekskurzija v Geopark Karavanke

SGD je organiziralo dvodnevno strokovno ekskurzijo (4. in 5. oktobra 2019) v Geopark Karavanke. Po geoloških točkah in zanimivostih so nas vodili dr. Walter Poltnig, dr. Darja Komar in mag. Mojca Bedjanič. Ogledali smo si ordo-vicijske blazinaste lave in izvire v Obirski soteski, Sotesko Korške peči in Potok graben, Šajda prelaz, Podkanjski slap, goro Sv. Heme, obiskali smo Podzemlje Pece – turistični rudnik in muzej, Obirsko jamo ter mineralni izvir »Carinthia Lithium«.

Geološki izlet v Belo krajino

20. novembra 2019 je SGD organiziralo ogled Muzejske hiše Semič in Centra narave Bele krajine, kjer smo si ogledali razstavo. Precejšen del razstave je namenjen geološkim vsebinam, in sicer nastanku belokranjskih kamnin,



Sl. 5. Udeleženci strokovne ekskurzije v Geopark Karavanke na prelazu Šajna (območje periadriatske prelomne cone).

njihovi uporabi in kraški krajini ter ranljivosti podzemlja. Po razstavi so nas vodili avtorji razstave: Boštjan Rožič, Petra Žvab Rožič, Rok Brajkovič in Marijan Poljak. Na poti do Semiča smo si ogledali kamniti gozd in izvir Krupe.

Program in načrti za leto 2020

Zaradi izrednih razmer in ukrepov, ki so bili uvedeni zaradi epidemije koronavirusa, so vse aktivnosti, ki so bile načrtovane v prvi polovici leta odpadle in jih bomo skušali izvesti, ko se bodo razmere vrnile v normalno stanje.

Strokovna predavanja

Izvedli smo le eno strokovno predavanje Jerneja Kerčmarja (Petrol Geo d.o.o.) z naslovom »Visokotemperaturni geotermalni viri v Sloveniji z možnostjo proizvodnje električne energije«, 5. februar 2020 ob 17. uri v Ljubljani na Oddelku za geologijo NTF, Aškerčeva 12, v predavalnici 209. Vsa ostala načrtovana predavanja so odpadla in upamo, da jih bomo lahko izvedli v jesenskem obdobju.



Sl. 6. Kamniti gozd (foto: Branka B. Železnik)

Strokovne ekskurzije

Zaradi razmer je odpadla geološka ekskurzija v Armenijo, ki bi nas popeljala po geoloških točkah in znamenitostih. Skušali jo bomo organizirati v letu 2021.

Ravno tako je odpadla načrtovana terenska delavnica in predavanje o ihnologiji – “Ichno-logy: Organism-substrate interactions in space and time”, ki naj bi jo vodila Gabriela Mangano in Luis Buatios (University of Saskatchewan, Kanada).

V maju 2020 načrtovan geološki izlet v Geopark Idrija bomo skušali izvesti v jesenskem obdobju. V letu 2020 je načrtovan tudi geološki izlet na Potočko zijalko in ogled paleontološke zbirke v Solčavi.

V jesenskem času je načrtovan ogled Geotermalne učne poti Cerčno.

Aktivnosti za promocijo geologije

V sodelovanju z Oddelkom za geologijo Naravoslovnotehniške fakultete bo organizirana okrogla miza na temo geoloških vsebin v formal-



Sl. 7. Izvir Krupe (foto: Branka B. Železnik)

nem izobraževanju (pregled za nazaj in izzivi za prihodnost), kjer bodo povabljeni predstavniki stroke, odločevalskih institucij (npr. ministrstvo, Zavod za šolstvo), založbe in predstavniki iz prakse (učitelji).

Dogodek Dan geologije, s katerim želimo širši javnosti predstaviti pomen geologije v vsakdanjem življenju in s tem ozavestiti zavedanje o pomembnosti te stroke, je bil načrtovan za 22. april – Dan Zemlje in se bo verjetno izvedel v jesenskem obdobju. Dogodek se izvaja v okviru formalnega in neformalnega izobraževanja. Kot izvajalci na dogodku sodelujejo strokovnjaki geologi iz različnih institucij.

S sodelovanjem na različnih dogodkih si želimo geološko znanost predstaviti širši javnosti, tako z vidika njene znanstvene pomembnosti, kakor uporabnosti v sodobni družbi. Tematsko se delavnice in predstavitve prilagajajo tematici posameznega dogodka. Sodelovanje na 48. mednarodnih dnevih mineralov, fosilov in okolja MINFOS v Trziču, na Vrtu eksperimentov v okviru 12. Znanstivala in na Dnevu za Savinjo je zaradi razmer odpadlo. Upamo, da se bosta izvedla 12. koliščarski dan in Noč raziskovalcev.

V okviru Sekcije za promocijo geološke znanosti bomo pripravili predlog sprememb in nadgradnje geoloških vsebin v obstoječih učnih načrtih za osnovne in srednje šole.

Delovna akcija čiščenja geološkega profila

Tradicionalna delovna akcija čiščenja zarasti na geoloških naravnih vrednotah v sodelovanju z Zavodom RS za varstvo narave bo izvedena v jesenskem obdobju, če bodo razmere to dopuščale. Lokacija trenutno še ni določena.

GeoTEK

Peti tradicionalni GeoTEK bo Slovensko geološko društvo organiziralo tudi v oktobru 2020. Letos bomo tekli in spoznavali geologijo Rožnika ali Toškega čela.

Druge aktivnosti v letu 2020

Nadaljevali bomo delo na pripravi Zakona o geosferi. Pričeli bomo s pripravami na 6. Slovenski geološki kongres.

Mednarodna zveza za raziskovanje kvartarja (SINQUA) je pod okriljem SGD načrtovala organizacijo 6th Regional Scientific Meeting on Quaternary Geology: Seas, Lakes and Rivers, v oktobru 2020 v Ljubljani, vendar je dogodek prestavljen na leto 2021.

V letu 2021 bo SGD praznovalo 70 let delovanja. Ob temu dogodku se načrtujejo aktivnosti, ki bi poudarile pomen geologije v družbi. Vabljeni vsi s predlogi, idejami, predvsem pa z energijo in voljo sodelovati pri aktivnostih!

Članarina

Tudi v letu 2020 znaša članarina za člane 15 EUR, za študente pa 7,5 EUR. Vabljeni, da podaljšate članstvo oziroma postanete član.

In še preostale aktivnosti

SGD dobro sodeluje s tujimi geološkimi društvi (predvsem Hrvaškimi in Srbskimi) ter z drugimi društvi s sorodnimi cilji (Geomorfološkim društvom Slovenije – GDS, Društvom slovenski komite mednarodnega združenja hidrogeologov – SKIAH, Prirodoslovnim društvom Slovenije – PDS).

S strani Centralne tehnične knjižnice smo prejeli pobudo za sodelovanje v njihovih Ustvarjalnicah. Oblika in vsebine še niso dogovorjene.

V spomin Dragici Strmole



Dragica Strmole se je rodila 17. aprila 1932 v Ljubljani, kjer je obiskovala osnovno in srednjo šolo. Po maturi na VII. Gimnaziji se je 1950 vpisala na takratno Prirodoslovno-matematično fakulteto UL, na Oddelek za geologijo in paleontologijo. Po diplomi leta 1956 se je zaposlila na Geološkem zavodu Ljubljana in pokrivala področje mineralogije in petrologije. Po strokovnem izpitu 1960 se je naslednje leto zaposlila na Fakulteti za naravoslovje in tehnologijo kot asistentka na Katedri za mineralogijo in petrografijo. Leta 1974 je bila izvoljena v naziv višja strokovna sodelavka. Večkrat je bila predstojnica Oddelka za geologijo in dolga leta glavna organizatorica Informativnih dni za študij geologije.

Raziskovalno in strokovno je bila usmerjena v mikroskopijo mineralov in kamnin ter v določanje trdote mineralov in uporabo metode faznega kontrasta. V soavtorstvu je objavila 21 del in več strokovnih poročil. Sodelovala je predvsem pri raziskavah slovenskih triasnih vulkanskih kamnin iz obrobja Ljubljane, Pokljuke, Jelovice, Julijskih Alp, zahodnih Karavnak in vzhodne Slovenije. Sodelovala je pri prvih

izotopskih raziskavah pohorskih magmatskih kamnin, kot tudi različnih rudišč v Črni gori. Njeno odlično poznavanje petrologije je vodilo do povezovanja z arheologi in sodelovanja pri raziskavah najdišča Divje Babe. Skupaj s prof. Grafenauerjem je z ugotavljanjem povezave med optičnimi lastnostmi in kemizmom rogovače, postavila prve temelje za modern pristop, ki se je razvil v elektronsko mikroskopijo in geokemijo. Tudi dela s področje mineralogije glin in njihove uporabe v keramični industriji, so odpirala pot popolnoma novi uporabi geoloških znanj v industriji materialov.

Enako ali morda še bolj pomembno je bilo njeno delovanje na področju popularizacije geologije ter uvajanja geoloških vsebin na nižje stopnje izobraževanja. Za potrebe usmerjenega izobraževanja je za smeri Geologija in Rudarstvo napisala učbenik Mineralogije in sodelovala pri monografiji Minerali na Slovenskem. Skrbela je za razvoj in razlago ustrezne strokovne terminologije in je soavtorica tako Kamnarsko geološkega leksikona kot tudi Geološkega terminološkega slovarja.

Njeno raziskovalno delo je bilo leta 1972 priznано z nagrado Sklada Borisa Kidriča, ki jo je skupaj s prof. Duhovnikom in prof. Grafenauerjem dobila za delo »Wengenska metalogena doba«.

Ko se spominjamo Dragice Strmole, se spominjamo njenega pedagoškega dela, ki mu je bila s srcem predana. Za študente geologije, rudarstva in metalurgije je vodila vaje iz kristalografije, mineralogije, petrologije in laboratorijske preiskave mineralov. Težko snov in številne podatke, je znala študentom približati z jasnimi razlagami ter jih popestriti s praktičnimi primeri. Tudi z najbolj nenadarjenimi, je bila neskončno potrpežljiva in prijazno ponovno razložila snov. Na nas je prenesla svoje navdušenje nad minerali in kamninami, zato smo pogosto k njej prihajali s svojimi primerki in jo spraševali za kateri mineral gre. Ponujeni kos je prijela v roke, dvignila očala in ga začela pozorno opazovati ter razlagati, kaj opaža in kaj to pomeni. Nikoli ji ni bilo nerodno priznati, da iz majhnega koščka ne uspe prepoznati materiala. Znala je svetovati, kaj bi bilo potrebno narediti, da bi se približali pravemu odgovoru. Študenti in kasneje sodelavci pa nismo cenili le njenega strokovnega znanja, temveč predvsem človeško toplino in posluš za sočloveka. Prepoznala je naše stiske, se nam znala približati, svetovati in pomagati. Čeprav so nas ostali pedagoški delavci stalno opozarjali, da naj je ne naslavljamo Dragica, ampak asistentka Strmoletova, je vedno ostala naša Dragica.

Upokojila se je leta 1991, a se občasno še vračala na oddelek. Vedno čila, nasmejana, vesela vseh naših uspehov in razumevajoča, če ni šlo vse po načrtih. Zadnjikrat smo se srečali ob obeleževanju prvih predavanj ob 100-letnici Univerze v Ljubljani. Na slovesnost je prišla sama, z avtobusom – kot vedno. Vsi, ki nas je kdaj učila, smo pristopali k njej, jo pozdravili in pogosto nadaljevali z... saj se me verjetno ne spomnite... in Dragica je odgovorila – kako ne, vi ste... in naštevala naša imena. Ko smo se poslavljali, se nismo zavedali, da je to bilo končno slovo. A ostalo je njeno sporočilo – pomembno je znanje, a še več je vredno biti Človek. To je naša Dragica bila in tako bo zapisana v našem spominu. Hvala za vse, kar si nam dala!

Nina Zupančič in Meta Dobnikar

V spomin Vladimirju Ferjančiču



Sredi julija 2020 je ugasnilo življenje Vladimirja – Lada – Ferjančiča, geologa, ki je pustil svojo sled na področju regionalne geologije in hidrogeologije. Lado Ferjančič, ki so ga zaradi njegove dobrodušne in šegave narave njegovi prijatelji in bližnji sodelavci klicali Ati, je pri svojem vsakdanjem delu izhajal iz svojih dolgoletnih izkušenj terenskega, predvsem kartirajočega geologa. Bil je dober praktični poznavalec stratigrafije in litologije ter strukturnih razmer širšega območja Gorenjske in zahodne Slovenije.

Vladimir Ferjančič se je rodil 13. julija 1934 v Ljubljani v delavski družini materi Ivani in očetu Ivanu. Mladost je preživel v Ljubljani, kjer je hodil v osnovno šolo, med drugo svetovno vojno tudi v nemško osnovno šolo, kjer se je naučil tekoče nemško, kar je kasneje igralo pomembno vlogo pri njegovem sodelovanju z avstrijskimi geologi. Z materjo sta po vojni stanovala v Fondovih blokkih za Bežigradom. Po končani osnovni šoli se je vpisal na Geološko srednjo tehniško šolo v Beogradu, ki jo je z diplomom končal 24. junija 1954. Po zaključku srednješolskega šolanja se je jeseni leta 1954 vpisal na študij geologije na Univerzi v Ljubljani, ki pa ga ni dokončal. Kot geološki tehnik se

je zaposlil februarja leta 1959 na Geološkem zavodu Ljubljana, kjer je pričel delati na projektu Osnovna geološka karta Jugoslavije. Istega leta se je poročil z ženo Olgo in v zakonu sta se jima rodila dva sinova. V obdobju zgodnjih šestdesetih let 20. stoletja, ko je velik del geologov Geološkega zavoda Ljubljana delal v Alžiriji, je pri teh raziskavah v letih 1963 in 1964 sodeloval tudi sam. Leta 1983 je iz sektorja Geološkega zavoda Ljubljana, ki se je ukvarjal z regionalno geologijo, preselil na Oddelek za hidrogeologijo in inženirsko geologijo, na katerem je ostal do svoje upokojitve januarja leta 1996. V devetdesetih letih, po osamosvojitvi Slovenije, je v državi široko zacvetela podjetniška pobuda. Nove in spremenjene razmere je izkoristil tudi Lado Ferjančič. Že nekoliko pred upokojitvijo je ustanovil Getes d.o.o. podjetje, ki je bilo registrirano za geologijo, tehniko, svetovanje in trgovino, v okviru katerega je bil aktiven tudi po upokojitvi. Na področju hidrogeologije je v svojem podjetju delal tako rekoč vse do svoje smrti 17. julija 2020. V geologiji je aktivno deloval več kot šestdeset let.

Vsebinsko gledano lahko Ferjančičevo geološko delo razdelimo v dve obdobji. Prvo obdobje predstavlja delo na področju regionalne geologije, kjer je kot terenski geološki tehnik delal na vrsti osnovnih geoloških kart Jugoslavije. Pri izdelavi geoloških kart je v terenski ekipi najprej sodeloval s prof. dr. Marijem Pleničarjem, po njegovem odhodu na fakulteto pa s Karlom Gradom. S slednjim sta v soavtorstvu pripravila karto lista Kranj (izšla 1974) in njen tolmač (izšel leta 1976). Sodeloval je še pri izdelavi skoraj vseh listov geoloških kart na območju Slovenije. To so bili listi kart: Postojna, Ribnica, Gorica, Trst, Slovenj Gradec, Beljak in Ponteba, Ljubljana, Ravne na Koroškem ter Tolmin in Videm. Oddelek za regionalno geologijo Geološkega zavoda Ljubljana je občasno sodeloval tudi pri raziskavah mineralnih surovin, zlasti pri ugotavljanju regionalnih geoloških razmer na področju nekaterih slovenskih kovinskih rudnikov. Ferjančič je kot kartirajoči geolog delal tudi na teh raziskavah. V Alžiriji je sodeloval pri regionalno geoloških terenskih raziskavah na območjih Kherzet Youssef in Djebel Gustar.

Drugo torišče njegovega dela predstavlja hidrogeologija. Z njo se je začel intenzivno ukvarjati v drugi polovici svoje kariere, po svojem prihodu na sektor Geološkega zavoda Ljubljana, ki se je ukvarjal s hidrogeološkimi raziskavami. V skladu s tedanjim načinom dela posameznih hidrogeologov, se je osredotočil regionalno, predvsem na probleme oskrbe s pitno vodo na območju Gorenjske. Tu je imel močne in dobre osebne stike z vodstvenimi delavci v lokalnih komunalnih podjetjih in v občinskih upravah. Glede na svojo odprto naravo je te stike stkal že med svojim delom regionalnega geologa, kasneje pa jih je utrjeval še kot hidrogeolog. Tako je deloval predvsem na področju nekdanjih velikih gorenjskih občin Kranj, Tržič, Radovljica in Jesenice. Te povezave je obdržal tudi kasneje, ko so ob reformi lokalne samouprave nastale manjše občine in jih ohranjal vse do svoje smrti. Sodeloval je pri vrtnanju številnih vodnjakov in izgradnji zajetij za katere je prispeval hidrogeološka izhodišča, prav tako je pripravljala strokovne osnove za vodovarstvena območja. V okviru njegovega hidrogeološkega dela je potrebno omeniti dva sklopa del. Prvi sklop predstavljajo hidrogeološke raziskave Karavank, kjer je prvi začel s prekomejnim sodelovanjem z avstrijskimi hidrogeologi na severni strani gorovja. Te raziskave so se pričele v sklopu gradnje cestnega predora skozi Karavanke med leti 1986 in 1989, pod njegovim vodstvom pa so se nadaljevale na območju celotnih zahodnih Karavank. Pri teh raziskavah je sodeloval vse do upokojitve. Drug pomemben segment njegovega hidrogeološkega dela predstavlja pobuda za izvedbo dveh globokih geotermalnih vrtin na območjih, ki predhodno niso veljale za geotermalno zanimiva. Prva vrtina je bila izvedena na območju Cerknega, segla je v globok dolomitni vodonosnik. Druga vrtina je bila izvedena v Kranjski gori na območju Savskega preloma. Če je prva vrtina podala zadovoljive rezultate in je omogočila tudi nov vpogled v regionalne geološke razmere na območju

Cerknega, pa pri drugi vrtini temu ni bilo tako. Žal je pri vrtini na območju Kranjske gore prišlo do širših nesporazumov in sporov v stroki, zaradi česar tudi podatki, ki so bili pridobljeni v okviru teh del, nikoli niso bili vpeti v širši regionalno geološki kontekst.

Vladimir Ferjančič je bil strasten zbiralec mineralov. Dolga časa je bil aktiven v društvih in neformalnih skupinah, ki so se ukvarjale s tem lepim in zanimivim hobijem. Čeprav je z minerali tudi občasno trgoval, je bila to predvsem zbirateljska strast. Za seboj je pustil lepo zbirko.

Ati je v družbi vedno skrbel za dobro voljo. Bil je vztrajen pripovedovalec, predvsem pa je imel na zalogi veliko šal, ki jih je stresal kot iz rokava. Prav zaradi tega je bil vedno dobrodošel sodelavec in gost, ki je znal včasih suhoparno geologijo in hidrogeologijo približati tudi navadnim ljudem, laikom, prav zaradi tega so mu ti zaupali in mu prepustili marsikatero delo, ki ga drugi hidrogeologi sicer ne bi dobili. Sodeloval je pri obsežnem pionirskem geološkem kartiranju slovenskega ozemlja, prispeval pa je tudi k nekaterim začetkom pomembnih hidrogeoloških del in raziskav, to sta regionalna hidrogeologija in geotermija. Čeprav nam pokojni Lado ni zapustil nobenih znanstvenih objav, kar je danes morda ne najbolj ustrezna mera dela aktivnih geologov, pa sta, ne glede na to, njegova energija in pozitivna naravnost prispevali k napredku slovenske geologije. In nenazadnje, njegovi pomembni dosežki ostajajo številni še delujoči vodnjaki in zajetja za oskrbo prebivalstva s pitno vodo. Vsi ki smo ga poznali, ga bomo ohranili v prijetnem spominu.

Mihael Brenčič

Navodila avtorjem

GEOLOGIJA objavlja znanstvene in strokovne članke s področja geologije in sorodnih ved. Revija izhaja dvakrat letno. Članke recenzirajo domači in tuji strokovnjaki z obravnavanega področja. Ob oddaji člankov avtorji predlagajo **tri recenzente**, uredništvo si pridržuje pravico do izbire recenzentov po lastni presoji. Avtorji morajo članek popraviti v skladu z recenzentskimi pripombami ali utemeljiti zakaj se z njimi ne strinjajo.

Avtorstvo: Za izvirnost podatkov, predvsem pa mnenj, idej, sklepov in citirano literaturo so odgovorni avtorji. Z objavo v GEOLOGIJI se tudi obvežejo, da ne bodo drugje objavili prispevka z isto vsebino.

Avtorji z objavo prispevka v GEOLOGIJI potrjujejo, da se strinjajo, da je njihov prispevek odprto dostopen z izbrano licenco **CC-BY**.

Jezik: Članki naj bodo napisani v angleškem, izjemoma v slovenskem jeziku, vsi pa morajo imeti slovenski in angleški izvleček. Za prevod poskrbijo avtorji prispevkov sami.

Vrste prispevkov:

Izvirni znanstveni članek

Izvirni znanstveni članek je prva objava originalnih raziskovalnih rezultatov v takšni obliki, da se raziskava lahko ponovi, ugotovitve pa preverijo. Praviloma je organiziran po shemi **IMRAD (Introduction, Methods, Results, And Discussion)**.

Pregledni znanstveni članek

Pregledni znanstveni članek je pregled najnovejših del o določenem predmetnem področju, del posameznega raziskovalca ali skupine raziskovalcev z namenom povzemanja, analiziranja, evalvirati ali sintetizirati informacije, ki so že bile publicirane. Prinaša nove sinteze, ki vključujejo tudi rezultate lastnega raziskovanja avtorja.

Strokovni članek

Strokovni članek je predstavitev že znanega, s poudarkom na uporabnosti rezultatov izvirnih raziskav in širjenju znanja.

Diskusija in polemika

Prispevek, v katerem avtor ocenjuje ali komentira neko delo, objavljeno v GEOLOGIJI, ali z avtorjem strokovno polemizira.

Recenzija, prikaz knjige

Prispevek, v katerem avtor predstavlja vsebino nove knjige.

Oblika prispevka: Besedilo pripravite v urejevalniku Microsoft Word. Prispevki naj praviloma ne bodo daljši od 20 strani formata A4, v kar so vštete tudi slike, tabele in table. Le v izjemnih primerih je možno, ob predhodnem dogovoru z uredništvom, tiskati tudi daljše prispevke.

Članek oddajte uredništvu vključno z vsemi slikami, tabelami in tablamami v elektronski obliki po naslednjem sistemu:

- Naslov članka (do 12 besed)
- Avtorji (ime in priimek, poštni in elektronski naslov)
- Ključne besede (do 7 besed)
- Izvleček (do 300 besed)
- Besedilo
- Literatura
- Podnaslovi slik in tabel
- Tabele, Slike, Table

Citiranje: V literaturi naj avtorji prispevkov praviloma upoštevajo le objavljene vire. Poročila in rokopise naj navajajo le v izjemnih primerih, z navedbo kje so shranjeni. V seznamu literature naj bodo navedena samo v članku omenjena dela. Citirana dela, ki imajo DOI identifikator (angl. Digital Object Identifier), morajo imeti ta identifikator izpisan na koncu citata. Za citiranje revije uporabljamo standardno okrajšavo naslova revije. Med besedilom prispevka citirajte samo avtorjev priimek, v oklepaju pa navajajte letnico izida navedenega dela in po potrebi tudi stran. Če navajate delo dveh avtorjev, izpišite med tekstom prispevka oba priimka (npr. Pleničar & Buser, 1967), pri treh ali več avtorjih pa napišite samo prvo ime in dodajte et al. z letnico (npr. Mlakar et al., 1992). Citiranje virov z medmrežja v primeru, kjer avtor ni poznan, zapišemo (Internet 1). V seznamu literaturo navajajte po abecednem redu avtorjev.

Imena fosilov (rod in vrsta) naj bodo napisana poševno, imena višjih taksonomskih enot (družina, razred, itn.) pa normalno. Imena avtorjev taksonov naj bodo prav tako napisana normalno, npr. *Clypeaster pyramidalis* Michelin, *Galeanella tollmanni* (Kristan), Echinoidea.

Primeri citiranja članka:

Mali, N., Urbanc, J. & Leis, A. 2007: Tracing of water movement through the unsaturated zone of a coarse gravel aquifer by means of dye and deuterated water. *Environ. geol.*, 51/8: 1401–1412. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0437-4>

Pleničar, M. 1993: *Apricardia pachiniana* Sirna from lower part of Liburnian beds at Divača (Triest-Komen Plateau). *Geologija*, 35: 65–68

Primer citirane knjige:

Flügel, E. 2004: *Mikrofacies of Carbonate Rocks*. Springer Verlag, Berlin: 976 p.

Jurkovič, B., Toman, M., Ogorelec, B., Šribar, L., Drobne, K., Poljak, M. & Šribar, Lj. 1996: Formacijska geološka karta južnega dela Tržaško-komenske planote – Kredne in paleogenske kamnine 1: 50.000 = Geological map of the southern part of the Trieste-Komen plateau – Cretaceous and Paleogene carbonate rocks. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 143 p., incl. Pls. 23, 1 geol. map.

Primer citiranja poglavja iz knjige:

Turnšek, D. & Drobne, K. 1998: Paleocene corals from the northern Adriatic platform. In: Hottinger, L. & Drobne, K. (eds.): *Paleogene Shallow Benthos of the Tethys*. Dela SAZU, IV. Razreda, 34/2: 129–154, incl. 10 Pls.

Primer citiranja virov z medmrežja:

Če sta znana avtor in naslov citirane enote zapišemo:

Čarman, M. 2009: Priporočila lastnikom objektov, zgrajenih na nestabilnih območjih. Internet: http://www.geo-zs.si/UserFiles/1/File/Nasveti_lastnikom_objektov_na_nestabilnih_tleh.pdf (17. 1. 2010)

Če avtor ni poznan zapišemo tako:

Internet: <http://www.geo-zs.si/> (22. 10. 2009)

Če se navaja več enot z medmrežja, jim dodamo še številko:

Internet 1: <http://www.geo-zs.si/> (15. 11. 2000)

Internet 2: <http://www.geo-zs.si/> (10. 12. 2009)

Slike, tabele in table: Slike (ilustracije in fotografije), tabele in table morajo biti zaporedno oštevilčene in označene kot sl. 1, sl. 2 itn., oddane v formatu TIFF, JPG, EPS ali PDF z ločljivostjo 300 dpi. Le izjemoma je možno objaviti tudi barvne slike, vendar samo po predhodnem dogovoru z uredništvom. Če avtorji oddajo barvne slike bodo te v barvah objavljene samo v spletni različici članka. Pazite, da bo tudi slika tiskana v sivi tehniki berljiva. Grafični materiali naj bodo usklajeni z zrcalom revije, kar pomeni, da so široki največ 172 mm (ena stran) ali 83 mm (pol strani, en stolpec) in visoki največ 235 mm. Večjih formatov od omenjenega zrcala GEOLOGIJE ne tiskamo na zgib, je pa možno, da večje oziroma daljše slike natisnemo na dveh straneh (skupaj na levi in desni strani) z vmesnim "rezom". V besedilu prispevka morate omeniti vsako sliko po številčnem vrstnem redu. Dovoljenja za objavo slikovnega gradiva iz drugih revij, publikacij in knjig, si pridobijo avtorji sami.

Če je članek napisan v slovenskem jeziku, mora imeti celotno besedilo, ki je na slikah in tabelah tudi v angleškem jeziku. Podnaslovi naj bodo čim krajši.

Korekture: Avtorji prejmejo po elektronski pošti članek v avtorski pregled. Popravijo lahko samo tiskarske napake. Krajši dodatki ali spremembe pri korekturah so možne samo na avtorjeve stroške.

Prispevki so prosto dostopni na spletnem mestu: <http://www.geologija-revija.si/>

Oddaja prispevkov:

Avtorje prosimo, da prispevke oddajo v elektronski obliki na naslov uredništva:

GEOLOGIJA

Geološki zavod Slovenije

Dimičeva ulica 14, SI-1000 Ljubljana

bernarda.bole@geo-zs.si ali urednik@geologija-revija.si

Instructions for authors

Scope of the journal: GEOLOGIJA publishes scientific papers which contribute to understanding of the geology of Slovenia or to general understanding of all fields of geology. Some shorter contributions on technical or conceptual issues are also welcome. Occasionally, a collection of symposia papers is also published.

All submitted manuscripts are peer-reviewed. When submitting paper, authors should recommend at least **three reviewers**. Note that the editorial office retains the sole right to decide whether or not the suggested reviewers are used. Authors should correct their papers according to the instructions given by the reviewers. Should you disagree with any part of the reviews, please explain why. Revised manuscript will be reconsidered for publication.

Author's declaration: Submission of a paper for publication in GEOLOGIJA implies that the work described has not been published previously, that it is not under consideration for publication elsewhere and that, if accepted, it will not be published elsewhere.

Authors agree that their contributions published in GEOLOGIJA are open access under the licence **CC-BY**.

Language: Papers should be written in English or Slovene, and should have both English and Slovene abstracts.

Types of papers:

Original scientific paper

In an original scientific paper, original research results are published for the first time and in such a form that the research can be repeated and the results checked. It should be organised according to the IMRAD scheme (**I**ntroduction, **M**ethods, **R**esults, **A**nd **D**iscussion).

Review scientific paper

In a review scientific paper the newest published works on specific research field or works of a single researcher or a group of researchers are presented in order to summarise, analyse, evaluate or synthesise previously published information. However, it should contain new information and/or new interpretations.

Professional paper

Technical papers give information on research results that have already been published and emphasise their applicability.

Discussion paper

A discussion gives an evaluation of another paper, or parts of it, published in GEOLOGIJA or discusses its ideas.

Book review

This is a contribution that presents a content of a new book in the field of geology.

Style guide:

Submitted manuscripts should not exceed 20 pages of A4 format including figures, tables and plates. Only exceptionally and in agreement with the editorial board longer contributions can also be accepted.

Manuscripts submitted to the editorial office should include figures, tables and plates in electronic format organized according to the following scheme:

- *Title (maximum 12 words)*
- *Authors (full name and family name, postal address and e-mail address)*
- *Key words (maximum 7 words)*
- *Abstract (maximum 300 words)*
- *Text*
- *References*
- *Figure and Table Captions*
- *Tables, Figures, Plates*

References: References should be cited in the text as follows: (Flügel, 2004) for a single author, (Pleničar & Buser, 1967) for two authors and (Mlakar et al., 1992) for multiple authors. Pages and figures should be cited as follows: (Pleničar, 1993, p. 67) and (Pleničar, 1993, fig. 1). Anonymous internet resources should be cited as (Internet 1). Only published references should be cited. Manuscripts should be cited only in some special cases in which it also has to be stated where they are kept. Cited reference list should include only publications that are mentioned in the paper. Authors should be listed alphabetically. Journal titles should be given in a standard abbreviated form. A DOI identifier, if there is any, should be placed at the end as shown in the first case below.

Taxonomic names should be in italics, while names of the authors of taxonomic names should be in normal, such as *Clypeaster pyramidalis* Michelin, *Galeanella tollmanni* (Kristan), Echinoidea.

Articles should be listed as follows:

Mali, N., Urbanc, J. & Leis, A. 2007: Tracing of water movement through the unsaturated zone of a coarse gravel aquifer by means of dye and deuterated water. *Environ. geol.*, 51/8: 1401–1412. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0437-4>

Pleničar, M. 1993: *Apricardia pachiniana* Sirna from lower part of Liburnian beds at Divača (Triest-Komen Plateau). *Geologija*, 35: 65–68.

Books should be listed as follows:

Flügel, E. 2004: *Mikrofacies of Carbonate Rocks*. Springer Verlag, Berlin: 976 p.

Jurkovšek, B., Toman, M., Ogorelec, B., Šribar, L., Drobne, K., Poljak, M. & Šribar, Lj. 1996: Formacijska geološka karta južnega dela Tržaško-komenske planote – Kredne in paleogenske kamnine 1: 50.000 = Geological map of the southern part of the Trieste-Komen plateau – Cretaceous and Paleogene carbonate rocks. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana: 143 p., incl. Pls. 23, 1 geol. map.

Book chapters should be listed as follows:

Turnšek, D. & Drobne, K. 1998: Paleocene corals from the northern Adriatic platform. In: Hottinger, L. & Drobne, K. (eds.): *Paleogene Shallow Benthos of the Tethys*. Dela SAZU, IV. Razreda, 34/2: 129–154, incl. 10 Pls.

Internet sources should be listed as follows:

Known author and title:

Čarman, M. 2009: Priporočila lastnikom objektov, zgrajenih na nestabilnih območjih. Internet: http://www.geo-zs.si/UserFiles/1/File/Nasveti_lastnikom_objektov_na_nestabilnih_tleh.pdf (17. 1. 2010)

Unknown authors and title:

Internet: <http://www.geo-zs.si/> (22.10.2009)

When more than one unit from the internet are cited they should be numbered:

Internet 1: <http://www.geo-zs.si/> (15.11. 2000)

Internet 2: <http://www.geo-zs.si/> (10.12. 2009)

Figures, tables and plates: Figures (illustrations and photographs), tables and plates should be numbered consecutively and marked as Fig. 1, Fig. 2 etc., and saved as TIFF, JPG, EPS or PDF files and submitted at 300 dpi. Colour pictures will be published only on the basis of previous agreement with the editorial office. If, together with the article, you submit colour figures then these figures will appear in colour only in the Website version of the article. Be careful that the grey scale printed version is also readable. Graphic materials should be adapted to the journal's format. They should be up to 172 mm (one page) or 83 mm wide (half page, one column), and up to 235 mm high. Larger formats can only be printed as a double-sided illustration (left and right) with a cut in the middle. All graphic materials should be referred to in the text and numbered in the sequence in which they are cited. The approval for using illustrations previously published in other journals or books should be obtained by each author.

When a paper is written in Slovene it has to have the entire text which accompanies illustrations and tables written both in Slovene and English. Figure and table captions should be kept as short as possible.

Proofs: Proofs (in pdf format) will be sent by e-mail to the corresponding author. Corrections are made by the authors. They should correct only typographical errors. Short additions and changes are possible, but they will be charged to the authors.

GEOLOGIJA is an open access journal; all pdfs can be downloaded from the website: <http://www.geologija-revija.si/en/>

Submission: Authors should submit their papers in electronic form to the address of the GEOLOGIJA editorial office:

GEOLOGIJA

Geological Survey of Slovenia
Dimičeva ulica 14, SI-1000 Ljubljana, Slovenia
bernarda.bole@geo-zs.si or urednik@geologija-revija.si

- 177 Gaberšek, M., Grčman, H. & Gosar, M.
Mineralna sestava, pedološke lastnosti in frakcionacija izbranih kemičnih elementov v tleh v Mariboru
- 193 Čenčur Curk, B.
Sledilni poskus na odlagališču komunalnih odpadkov Dragonja
- 203 Petrič, M., Ravbar, N., Gostinčar, P., Krsnik, P. & Gacin, M.
Vzpostavitev prosto dostopne GIS zbirke rezultatov sledenj toka podzemne vode in možnosti njene uporabe
- 221 Gosar, M., Šajn, R., Miler, M., Burger, A. & Bavec, Š.
Overview of existing information on important closed (or in closing phase) and abandoned mining waste sites and related mines in Slovenia
- 251 Nagode, K., Kanduč, T., Lojen, S., Bračič Železnik, B., Jamnik, B. & Vreča, P.
Synthesis of past isotope hydrology investigations in the area of Ljubljana, Slovenia
- 271 Turk, J., Urbanc, J., Mladenovič, A., Pavlin, A., Oprčkal, P., Fifer Bizjak, K., Likar, B., Brodnik, M. & Mali, N.
Izgradnja lizimetrov za preučevanje izpiranja potencialno nevarnih snovi iz gradbenih proizvodov
- 281 Serianz, L., Rman, N. & Brenčič, M.
Step-drawdown tests in exploitation wells for thermal and mineral water – Case study from Slovenia
- 295 Jamšek Rupnik, P., Žebre, M. & Monegato, G.
Late Quaternary evolution of the sedimentary environment in Modrejce near Most na Soči (Soča Valley, Julian Alps)
- 311 Križnar, M., Bricman, A. & Ocepek, I.
Spodnjekredni heteromorfni amoniti (Ancyloceratina) z Leš pri Prevaljah (Severne Karavanke, SV Slovenija)
- 323 Master, S.
Peripatetic careers of Vsevolod and Eugenie Gorsky, mid-20th century Slovenian-educated geoscientists