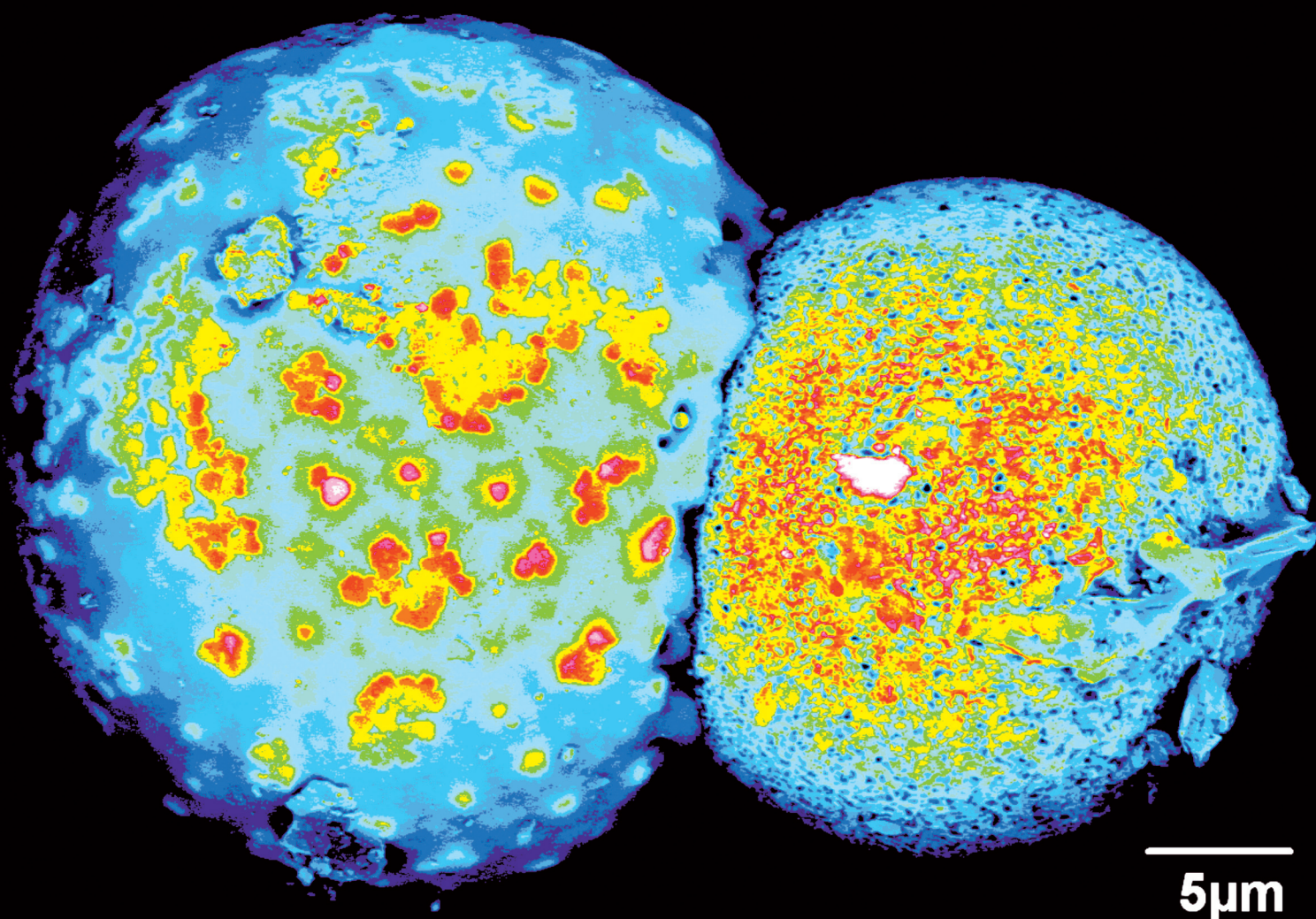


GEOLOGIJA

2009 | št.: **52/1**



Geološki zavod Slovenije
Geological Survey of Slovenia

ISSN 0016-7789
ISSN 1854-620X

GEOLOGIJA

52/1 – 2009



GEOLOGIJA	2009	52/1	1-148	Ljubljana
------------------	-------------	-------------	--------------	------------------

GEOLOGIJA

ISSN 0016-7789

© Geološki zavod Slovenije

Izdajatelj: Geološki zavod Slovenije, zanj direktor MARKO KOMAC
Publisher: Geological Survey of Slovenia, represented by Director MARKO KOMAC
Financirata Javna agencija za knjigo Republike Slovenije in Geološki zavod Slovenije
Financed by the Slovenian Book Agency and the Geological Survey of Slovenia

Vsebina številke 52/1 je bila sprejeta na seji Uredniškega odbora, dne 2. 6. 2009.
Manuscripts of the Volume 52/1 accepted by Editorial and Scientific Advisory Board on June 2, 2009.

Glavni in odgovorni urednik / Editor-in-Chief: BOJAN OGORELEC

Uredniški in recenzijski odbor / Scientific Advisory Board:

MIHAEL BRENČIČ, Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani
GIOVANNI BATTISTA CARULLI, Dip. di Sci. Geol., Ambientali e Marine, Università di Trieste
KATICA DROBNE, Znanstveno Raziskovalni Center SAZU, Ljubljana
MATIJA DROVENIK, Slovenska akademija znanosti in umetnosti, Ljubljana
JADRAN FAGANELI, Nacionalni inštitut za Biologijo, Morska biološka postaja Piran
MATEJA GOSAR, Geološki zavod Slovenije, Ljubljana
JANOS HAAS, Etvös Lorand University, Budapest
BOGDAN JURKOVŠEK, Geološki zavod Slovenije, Ljubljana
ROMAN KOCH, Institut für Paläontologie, Universität Erlangen-Nürnberg
MARKO KOMAC, Geološki zavod Slovenije, Ljubljana
HARALD LOBITZER, Geologische Bundesanstalt, Wien
RINALDO NICOLICH, D.I.N.M.A., Sezione Georisorse e Ambiente, Università di Trieste
SIMON PIRC, Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani
MARIO PLENIČAR, Slovenska akademija znanosti in umetnosti, Ljubljana
DANILO RAVNIK, Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani
MIHAEL RIBIČIČ, Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani
MARKO ŠPARICA, Institut za geološka istraživanja, Zagreb
SAŠO ŠTURM, Inštitut »Jožef Stefan«, Ljubljana
JOSIP TIŠLJAR, Rudarsko-geološki naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu
DRAGICA TURNŠEK, Slovenska akademija znanosti in umetnosti, Ljubljana
MIRAN VESELIČ, Fakulteta za Gradbeništvo in Geodezijo, Univerza v Ljubljani

Tehnična urednica / Technical Editor: BERNARDA BOLE

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

Dimičeva ulica 14, SI-1000 Ljubljana, Slovenija

Tel.: +386 (01) 2089-700, Fax: +386 (01) 2089-753, e-mail: urednik@geologija-revija.si

Spletni naslov / 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.

Baze, v katerih je Geologija indeksirana / Indexation bases of Geologija: GeoRef, Chemical Abstracts, PASCAL, Zoological Record

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: Tiskarna Formatisk d.o.o.

Naslovnica: Obarvan SEM posnetek sferičnih zrn visokotemperaturnega tehnogenega izvora: (Ca, Fe)-silikat (levo) in Ca-ferit (desno), (M. Miler & M. Gosar, članek v tej številki).

Cover: Coloured SEM image of spherical grains of high-temperature technogenic origin: (Ca, Fe)-silicate (left) and Ca-ferrite (right), (M. Miler & M. Gosar, paper in this issue).

VSEBINA – CONTENTS

<i>Kolar-Jurkovšek, T. & Jurkovšek, B.</i> Holoturijski skleriti iz karnijskih plasti okolice Mežice Holothurian sclerites of Carnian strata in the Mežica area, Slovenia	5
<i>Dozet, S.</i> Mohorje Formation, Southern Slovenia Mohorska formacija, južna Slovenija	11
<i>Kralj, P. & Dozet, S.</i> Volcanic succession of the Borovnik Member (Mohorje Formation), Bloke Plateau area, Central Slovenia Vulkanske kamnine Borovniškega člena Mohorske formacije na območju Bloške planote	21
<i>Pleničar, M. & Jurkovšek, B.</i> <i>Pseudopolyconites slovenicus</i> n.sp. resedimented to Paleocene flysch breccia of the Soča river valley (Slovenia) <i>Pseudopolyconites slovenicus</i> n.sp. presedimentiran v paleocensko flišno brečo Posočja	29
<i>Mikuž, V.</i> Nautilid iz srednjeeocenskih plasti pri Grdoselu v Istri na Hrvaškem A nautiloid from Middle Eocene beds at Grdoselo in Istria, Croatia	33
<i>Budkovič, T., Čarman, M. & Petkovšek, B.</i> Geologija avtocestnega predora Pletovarje Geology of Pletovarje motorway tunnel (Slovenia)	43
<i>Skaberne, D., Kralj, P. & Budkovič, T.</i> Tla na zgornjetriasnih karbonatnih kamninah Zahodnih Karavank in visokih planot Julijskih Alp Soils on the Late Triassic carbonate rocks in the West Karavanke Mountains and the high plateaus of the Julian Alps (Slovenia)	49
<i>Miler, M. & Gosar, M.</i> Application of SEM/EDS to environmental geochemistry of heavy metals Uporaba SEM/EDS v okoljski geokemiji težkih kovin	69
<i>Teršič, T. & Gosar, M.</i> Preliminary results of detailed geochemical study of mercury at the ancient ore roasting site Pšenk (Idrija area, Slovenia) Preliminarni rezultati geokemične raziskave živega srebra na območju nekdanje žgalnice rude Pšenk (Idrijsko, Slovenija)	79
<i>Komac, M., Kumelj, Š. & Ribičič, M.</i> Model dovzetnosti pojavljanja drobirskih tokov v Sloveniji v merilu 1 : 250.000 Debris-flow susceptibility model of Slovenia at scale 1 : 250,000	87
<i>Komac, M.</i> Vloga javnega instituta geološkega zavoda pri preprečevanju geohazardov in zmanjševanju njihovih posledic ... Contribution of public Geological Survey to prevention and mitigation of geohazards	105

<i>Prestor, J., Strosser, P., Bouscasse, H., Krivic, J. & Eržen, N.</i>	
Which monetary values for the quality of our environment? The example of pollution in the Krška kotlina alluvial aquifer in Slovenia	113
Kako denarno vrednotiti kakovost našega okolja? Primer onesnaženja aluvialnega vodonosnika Krške kotline v Sloveniji	
<i>Petrič, M.</i>	
Pregled sledenja voda z umetnimi sledili na kraških območjih v Sloveniji	127
Review of water tracing with artificial tracers on karst areas in Slovenia	
<i>Turk, J.</i>	
Hidrogeologija Vetrovne jame v vodonosniku severno od Planinskega polja	137
Hydrogeology of the cave Vetrovna jama in karst aquifer north from Planinsko polje (Notranjska region, central Slovenia)	
Navodila avtorjem	145
Instructions to authors	147

Holoturijski skleriti iz karnijskih plasti okolice Mežice

Holothurian sclerites of Carnian strata in the Mežica area, Slovenia

Tea KOLAR-JURKOVŠEK & Bogdan JURKOVŠEK

Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ul. 14, SI-1000 Ljubljana, Slovenija, e-mail: tea.kolar@geo-zs.si;
bogdan.jurkovsek@geo-zs.si

Prejeto / Received 7. 1. 2009; Sprejeto / Accepted 30. 1. 2009

Ključne besede: holoturijske, trias, karnij, biostratigrafija, Mežica, Slovenija

Key words: holothurians, Triassic, Carnian, biostratigraphy, Mežica, Slovenia

Izvleček

V članku so opisani holoturijski skleriti iz drugega klastičnega horizonta »Rabeljskih plasti« mežiškega prostora. V združbi prevladuje rod *Theelia*, ki ga zastopajo vrste *T. immisorbicula* Mostler, *T. planorbicula* Mostler in *T. ex gr. variabilis* Zankl, prisotna je tudi vrsta *Priscopedatus ploechingeri* Mostler. Julska starost plasti s holoturijami je določena na osnovi konodontnega aparata *Nicoraella ? budaensis* Kozur & Mock.

Abstract

The paper presents holothurian sclerites from the 2nd clastic horizon of the "Raibl Beds" in the Mežica area. The fauna is dominated by genus *Theelia*, represented by *T. immisorbicula* Mostler, *T. planorbicula* Mostler and *T. ex gr. variabilis* Zankl in association with species *Priscopedatus ploechingeri* Mostler. Julian age of the holothurian-bearing bed is defined by conodont apparatus *Nicoraella ? budaensis* Kozur & Mock.

Uvod

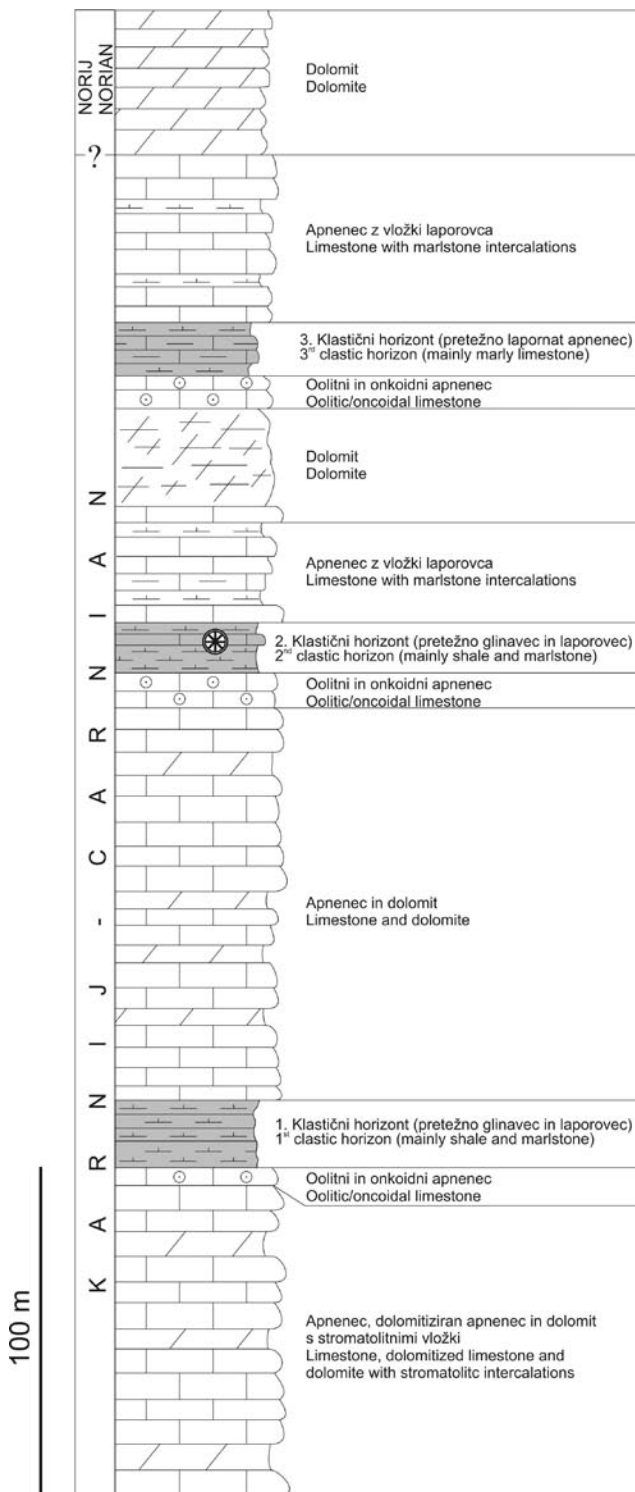
Karnijske »Rabeljske plasti« mežiškega prostora, v katerih je nahajališče s holoturijami (sl. 1), so bile zaradi rudarjenja predmet številnih geoloških raziskav. Ležijo severno od Periadriatskega lineamenta, ki predstavlja eno najmarkantnejših struktur v Alpah in deli Južne Alpe od severno ležečih Zahodnih, Osrednjih in Vzhodnih Alp. Raziskane plasti (sl. 2) se nahajajo na prostoru Severnih Karavank, ki so del zgornje strukturne etaže Vzhodnih Alp, in jih prištevamo skupaj z Ziljskimi Alpami k Dravskemu nizu (PLACER, 1999). Stratigrafski razvoj tega je skoraj identičen tistemu v Severnih apneniških Alpah. Z namenom, da bi naredili rekonstrukcijo paleokolja, so bile že v preteklosti opravljene številne biostratigrafske raziskave (JURKOVŠEK, 1978; JELEN & KUŠEJ, 1982; PUNGARTNIK et al., 1982; JURKOVŠEK & KOLAR-JURKOVŠEK, 1997; JURKOVŠEK et al., 2002; KOLAR-JURKOVŠEK et al., 2003; KAIM et al., 2006).

Paleontološko so v »Rabeljskih plasteh« najbolj zanimivi trije klastični horizonti in onkoidno-oolitne plasti v njihovi podlagi. Te plasti smo v dolgem obdobju od 1980 do 2007 vzorčevali in topili za konodontne analize. Naš namen je bil dokazati prisotnost konodontov, s katerimi je mogoče določiti natančno starost »Rabeljskih



Sl. 1. Geografska skica s položajem raziskanih karnijskih plasti s holoturijami v Helenski grapi pri Mežici.

Fig. 1. Geographic sketch map with location of the studied Carnian strata with holothurians in the Helena Creek in the Mežica area (Karavanke Mts, Slovenia).



Sl. 2. Litostratigrafski stolpec karnijskih plasti mežiškega prostora v Karavankah z označenim položajem raziskanega vzorca.

Fig. 2. Lithostratigraphic column of the Carnian strata of the Mežica area, Karavanke Mts (Slovenia) with position of the studied sample.

plasti«, imajo pa tudi veliko vrednost pri regionalnih primerjavah. En sam vzorec mikritnega apnenca (H 4/5) v drugem klastičnem horizontu je vseboval konodontno monofavno, ki jo predstavlja multielement *Nicoraella ? budaensis* Kozur & Mock (KOLAR-JURKOVŠEK & JURKOVŠEK, v tisku). Najdeni konodontni aparat dokazuje julsko starost plasti in predstavlja pomemben podatek

za kronostratigrafsko definiranje kratke humidne epizode v karnijski dobi. V tem članku predstavljamo holoturijske sklerite, ki so sestavni del mikrofavne vzorca H 4/5. Sklerite holoturij v vzorcu poleg konodontov spremljajo še zelo redki osikli drugih iglokožcev, foraminifere, juvenilne školjke, polži in brahiopodi.

Geološke razmere

Karnijske plasti Rabeljske grupe v Zahodnih Karavankah vključujejo tri klastične horizonte, ki se pojavljajo v podobnih litoloških oblikah na širšem območju Vzhodnih Alp. Na mežiškem prostoru leži pod vsakim klastičnim horizontom nekaj metrov oolitno-onkoidnega apnenca, ki vsebuje bogato karnijsko favno. Te plasti so proučevali že TELLER (1896), ZORC (1955) in ŠTRUCL (1961, 1971). Kratek pregled geologije okolice Mežice je bil podan na 1. slovenskem geološkem kongresu (PLACER et al., 2002).

Debelina karnijskih plasti v mežiškem prostoru dosega 300 do 350 m. Karbonatna sedimentacija je bila trikrat prekinjena zaradi dotoka terigenega materiala, katerega skrivilava tekstura je nastala med diagenetskimi procesi. Opazna je rast vsebnosti karbonata od prvega proti tretjemu klastičnemu horizontu: prvi klastični horizont vsebuje 5–8 %, drugi 30–40 % in tretji 70 % kalcijevega karbonata (PUNGARTNIK et al., 1982). V vseh treh klastičnih horizontih je bila ugotovljena palinoflora (JELEN & KUŠEJ, 1982). Higrofilni elementi prvega in drugega klastičnega horizonta so primerljivi z združbami sporomorf »Rabeljskih plasti« Avstrije (ROGHI et al., 2008), ki so nastale v času karnijskih humidnih epizod. Jasna klimatska sprememba je bila ugotovljena v Severnih apeniških Alpah in opisana kot »Reingraben Wende« (SCHLAGER & SCHÖLLNBERGER, 1974). Kasneje je bil za ta pojav uveden izraz »Carnian Pluvial Episode« (SIMMS & RUFFELL, 1989), ki je zelo razširjen po svetu (HORNUNG et al., 2007; RIGO et al., 2006; BREDA et al., 2008; HORNUNG & BRANDNER 2008; KOZUR & BACHMANN, 2008).

Litološka cikličnost ponavljajočih karbonatno-klastičnih sekvenc Rabeljske grupe je rezultat evstatičnega nihanja morske gladine (HAGEMASTER, 1988). Po HAQ-u in sodelavcih (1987) karnij označujeta dva transgresijsko-regresijska cikla 3. reda, ki sta po BECHSTÄDTU in SCHWEIZERJU (1991) primerljiva s prvim in tretjim klastičnim horizontom Rabeljske grupe. Klastični horizonti so nastali v fazi visokega vodostaja, ko so se rečni klastiti predelali in se ponovno razporedili po karbonatni platformi, delte pa so se umaknile nazaj v notranji šelf. Litološka cikličnost karnijskih plasti v mežiškem prostoru nedvomno predstavlja enak model sedimentacije kot sta ga opisala BECHSTÄDT in SCHWEIZER (1991) za karbonatno klastične cikle Rabeljske skupine Vzhodnih Alp.

Holoturijska favna

Material in metode

Raziskane holoturijske sklerite smo našli v vzorcu H 4/5 skupaj s konodonti in drugo spremljevalno mikrofavno. Raztopili smo več kot 12 kg vzorca apnenca po standardni metodi za topljenje konodontnih vzorcev z uporabo očetne kisline. Kasneje je sledila še ločitev kamninskih frakcij z bromoformom. Posnetki holoturijskih skleritov so bili narejeni na elektronskem mikroskopu JEOL JSM – 300A Paleontološkega inštituta Ivana Rakovca ZRC SAZU in JEOL JSM 6490LV Geološkega zavoda Slovenije. Ves upodobljeni material je shranjen na Geološkem zavodu Slovenije pod inventarno številko GeoZS 4282.



Sl. 3. Pogled na zgornji del 2. klastičnega horizonta z apnenčevimi plastmi v Helenski grapi.

Fig. 3. View to the upper part of the 2nd clastic horizon with limestone beds in the Helena Creek.



Sl. 4. Bližnji pogled na apnenčevo plast pred odvzemom vzorca H 4/5.

Fig. 4. Close view to the limestone bed prior collecting the sample H 4/5.

Opis holoturijske združbe

Mikrofavna vzorca H 4/5 iz drugega klastičnega horizonta v Helenski grapi (sl. 3, 4) je bila zaradi pomembne najdbe konodontnega aparata *Nicoraella ? budaensis* predmet podrobnega študija (KOLAR-JURKOVŠEK & JURKOVŠEK, v tisku). V tem članku je predstavljena holoturijska favna (tab. 1). Določene so bile naslednje oblike:

Theelia immisorbicula Mostler (tab. 1, sl. 1–2),
Theelia planorbicula Mostler (tab. 1, sl. 3–4),
Theelia ex gr. *variabilis* Zankl (tab. 1, sl. 9–10),
Theelia sp. (tab. 1, sl. 5–8),
Priscopodatus ploechingeri Mostler (tab. 1, sl. 11).

V združbi prevladujejo okrogli skleriti rodu *Theelia*, posamezne vrste so bile določene na osnovi morfoloških razlik, predvsem velikosti števila in širine prečk. Vse tri vrste se medsebojno razlikujejo tudi po višini pesta. V združbi se nahaja tudi sklerit z značilno oblikovanimi štirimi porami, sredinskim stolpičem in nepravilno zgrajenim zunanjim robom, ki pripada vrsti *Priscopodatus ploechingeri*.

Med vsemi določenimi oblikami prevladuje vrsta *T. immisorbicula*, ki je prepoznavna po majhni velikosti in ima močno dvignjen pesto, zelo pogostna je v karnijskih plasteh Slovaške (GAZDZICKI et al., 1978; KOZUR & MOCK, 1974), sicer pa je poznana iz številnih srednje- in zgornjetriasnih nahajališč v Alpah (MOSTLER, 1968). Primerke vrste *T. planorbicula* so doslej našli v plasteh anizijske in norijske starosti Avstrije in Slovaške (MOSTLER, 1968; KOZUR & MOCK, 1972, 1974; PEVNY, 1981; PAPAŠOVA & PEVNY, 1982). Vrsta *T. variabilis* je bila prvič opisana iz dachsteinskih apnencev (norijski-retijskih) Severnih apneniških Alp (ZANKL, 1966), medtem ko je podvrsta *T. variabilis slovakensis* Kozur & Mock doslej najdena v karnijskih in norijskih plasteh Slovaške (KOZUR & MOCK, 1972, 1974). Vrsta *P. ploechingeri* je dobro dokumentirana v številnih zgornjetriasnih nahajališčih Severnih apneniških Alp (MOSTLER, 1969).

Vse najdene holoturijske vrste so bile doslej že opisane iz slovenskih nahajališč. Iz karnijskih plasti Julijskih Alp je poznana raznovrstna mikrofavna, ki jo sestavljajo holoturijski skleriti rodov *Theelia* in *Priscopodatus*, med katerimi sta najpogostejši vrsti *T. immisorbicula* in *T. planorbicula* (KOLAR-JURKOVŠEK, 1991). V spodnjem norijskih apnencih globjemorskega razvoja Slemena v Kamniških Alpah je bila najdena bogata združba konodontov in holoturij, ki vključuje številne vrste rodu *Theelia* (JAMNIK & RAMOVŠ, 1993).

Fosilna združba »Rabeljskih plasti« mežiškega prostora

V članku so opisani holoturijski skleriti iz Helenske grape mežiškega prostora (Karavanke), ki jih spremljajo nekateri drugi fosili. Najpomembnejša je konodontna vrsta *Nicoraella ? budaensis*, ki so jo doslej našli le v nekaj nahajališčih Madžarske in Italije, kjer se nahaja v plasteh bazenskega faciesa. V Sloveniji se ta vrsta pojavlja v »Rabeljskih plasteh« Belce (Karavanke) in sestavlja tipično karnijsko bioto, kjer se poleg konodontne vrste *Nicoraella ? budaensis* pojavljajo tudi foraminifere intervalne cone *Pilamminella kuthani* in alga *Clypeina besici* Pantić, ki je vodilna conska vrsta (GRGASOVIĆ, 1997; DOBRUSKINA et al. 2001; KOLAR-JURKOVŠEK & JURKOVŠEK, 2003; KOLAR-JURKOVŠEK et al., 2005).

»Rabeljske plasti« mežiškega prostora so pomembne zaradi bogate in raznovrstne fosilne vsebine. Bogato karnijsko makrofavno iz prvega klastičnega horizonta je opisal JURKOVŠEK (1978) in jo primerjal s favno v avstrijskem Bleibergu. V onkoidno-oolitnih plasteh pod prvim in drugim klastičnim horizontom je bila kasneje najdena bogata krinoidna favna, iz katere je opisana tudi nova vrsta *Laevigatocrinus pecae* Jurkovšek & Kolar-Jurkovšek (JURKOVŠEK & KOLAR-JURKOVŠEK, 1997). Med novejšje paleontološke najdbe iz talnine drugega klastičnega horizonta uvrščamo thecideidne brahiopode, posebno še filogenetsko in morfološko pomembno vrsto *Thecospira haidingeri* (Suess) (JURKOVŠEK et al., 2002). Iz karnijskih plasti mežiškega prostora je opisana tudi gastropodna favna, ki kaže jasne razlike z enako staro združbo iz cassijanskih plasti v Dolomitih. Skupno je bilo opisanih 11 gastropodnih vrst, od tega so nove vrste *Sloeudaronia karavankensis*, *Helenostelina mezicaensis*, *Ampezzopleura slovenica* in *Striazzyga crnaensis* in dva nova rodova, *Sloeudaronia* in *Helenostylina* (KAIM et al., 2006). Na osnovi florističnih elementov *Camerospirites secatus* in *Ovalipolis pseudoalatus* je dokazana pripadnost tega prostora severnemu pasu širokega ekvatorialnega palinoflorističnega območja v julski podstoppnji (JELEN & KUŠEJ, 1982).

Zaključki

Podrobno vzorčevanje za konodontne raziskave v »Rabeljskih plasteh« mežiškega prostora je dalo doslej pozitivne rezultate v eni sami apnenčevi plasti v vrhnjem delu drugega klastičnega horizonta v Helenski grapi. Za določitev julske starosti je pomembna zlasti monospecifična konodontna združba *Nicoraella ? budaensis* Kozur & Mock, ki je bila doslej znana le iz bazenskih faciesov. V raziskanem profilu se ta vrsta pojavlja v šelfnem prostoru v času visokega vodostaja. V holoturijski združbi iz iste plasti prevladuje rod *Theelia* z vrstami *T. immisorbicula* Mostler, *T. planorbicula* Mostler, *T. ex gr. variabilis* Zankl in vrsta *Priscopodatus ploechingeri* Mostler.

Zahvala

Avtorja se zahvaljujeva Dragici Turnšek za pregled in Bojanu Ogorelcu za urejanje članka, Heinzu Kozurju in Miku Orchardu za koristne sugestije pri študiju mikrofavne. Raziskava je bila opravljena na Geološkem zavodu Slovenije v okviru programa P1-001, ki ga finančno omogoča Agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije. To je prispevek projekta IGCP 467 (»Triassic Time«).

Holothurian sclerites of Carnian strata in the Mežica area, Slovenia

Extended summary

Carnian »Raibl Beds« of the Mežica area (Fig. 1) have been part of numerous geological studies due to extensive mining activity. The investigated section is located north of the Periadriatic Line that represents one of the most remarkable fault systems of the Alps, and it separates the Southern Alps from the northerly lying Western, Central and Eastern Alps. The studied »Raibl Beds« (Fig. 2) are situated in the Northern Karavanke Mts that form a part of the upper structural horizon of the Eastern Alps. In order to make paleoenvironmental reconstruction of this area, several biostratigraphic studies have been accomplished (JURKOVŠEK, 1978; JELEN & KUŠEJ, 1982; JURKOVŠEK & KOLAR-JURKOVŠEK, 1997; JURKOVŠEK et al., 2002; KAIM et al., 2006; PUNGARTNIK et al., 1982).

The Carnian succession in the Mežica area attains thickness of 300 to 350 meters. The carbonate sedimentation was three times interrupted due to increased influx of terrigenous material; siltstone, marlstone and shale were deposited at that time and their shaly appearance was developed during diagenetic processes. An evident increase of carbonate amount is documented in the clastic horizons: the first clastic horizon contains 5–8 percent, the second 30–40 percent and the third 70 percent of calcium carbonate (PUNGARTNIK et al., 1982). Differences were observed also in palynological assemblages: a decreasing deltaic influence from the first through the second to the third horizon, and an advanced marine influence are documented (JELEN & KUŠEJ, 1982). The hygrophytic elements of the first and the second clastic horizons can be compared to the Carnian humid sub-phases of the »Raibler Schichten« deposited in Austria (Roghi et al., 2008). A distinct climatic shifts were identified in the Northern Calcareous Alps and described as »Reingraben Wende« (SCHLAGER & SCHÖLLNERBERGE, 1974). Later, the term Carnian Pluvial Episode was used (SIMMS & RUFFELL, 1989) and this event was also widely recognized (HORNUNG et al., 2007; RIGO et al., 2006; BREDA, et al., 2008; HORNUNG & BRANDNER, 2008; KOZUR & BACHMANN, 2008).

The fossil microfauna from the limestone bed in the upper part of the second clastic horizon in the Helena Creek (Figs. 3, 4) was studied. It is characterized by prevailing conodonts and holothurians. Recovery of a monospecific conodont fauna with the multielement *Nicoraella ? budaensis* Kozur & Mock is important to define its Julian age. This species has been hitherto known from the basinal facies. In the studied section it occurs in the shelf facies deposited during sea-level highstand. The holothurian fauna (Plate 1) was collected in the same bed together with conodonts (sample H 4/5) and following taxa have been determined: *T. immisorbicula* Mostler, *T. planorbicula* Mostler, *T. ex gr. variabilis* Zankl and *Priscopodatus ploechingeri* Mostler.

Tabla 1 – Plate 1

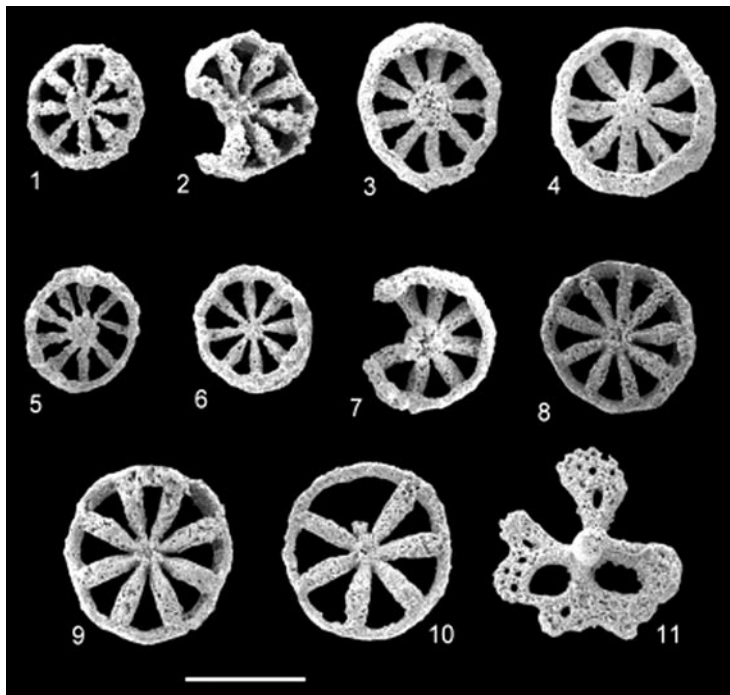


Tabla 1. Holoturijski skleriti iz »Rabeljskih plasti«, julska podstopnja, Helenski potok, Karavanke, Slovenija, vzorec H 4/5 (GeoZS 4282).

Plate 1. Holothurian sclerites from the »Raibl Beds«, Julian, Helena Creek, Karavanke Mts, Slovenia, sample H 4/5 (GeoZS 4282).

1, 2 *Theelia immisorbicula* Mostler

3, 4 *Theelia planorbicula* Mostler

5–8 *Theelia* sp.

9, 10 *Theelia* ex gr. *variabilis* Zankl

11 *Priscopedatus ploechingeri* Mostler

Scale bar 100 μ m.

References

- BECHSTÄDT, T. & SCHWEIZER, T. 1991: The carbonate-clastic cycles of the East-Alpine Raibl group: result of third-order sea-level fluctuations in the Carnian. *Sedimentary Geology* 70: 241–270.
- BREDA, A., PRETO, N., ROGHI, G., FURIN, S., MENEGUOLO, R., RAGAZZI, E., FEDELE, P. & GIANOLLA, P. 2008: The Carnian Pluvial Event in the Tofane area (Cortina d'Ampezzo, Dolomites, Italy). In: *The Triassic climate. Field trip guide, Bolzano 3–7 June, 2008*: 19–53.
- DOBROUSKINA, I. A., JURKOVŠEK, B. & KOLAR-JURKOVŠEK, T. 2001: Upper Triassic flora from "Raibl beds" of Julian Alps (Italy) and Karavanke Mts (Slovenia). *Geologija (Ljubljana)* 44/2: 263–290.
- GAZDZICKI, A., KOZUR, H., MOCK, R. & TRAMMER, J. 1978: Triassic microfossils from the Korytnica Limestones at Liptovska Osada (Slovakia, CSSR) and their stratigraphic significance. *Acta paleont. Polon.* 23: 351–373.
- GRGASOVIĆ, T. 1997: Upper Triassic Biostratigraphy and Algae from Žumberak (Croatia). *Geol. Croatica (Zagreb)* 50/2: 201–214.
- HAGEMEISTER, A. 1988: Zyklische Sedimentation auf einer stabilen Karbonatplattform: die Raibler Schichten (Karn) des Drauzuges/Kärnten (Österreich). *Facies* 18: 83–122.
- HAQ, B.U., HARDENBOL, J. & VAIL, P.R. 1987: Chronology of fluctuating sea-levels since the Triassic. *Science* 235: 1156–1167.
- HORNUNG, T. & BRANDNER, R. 2008: The Tethyan "Carnian Crisis". In: *The Triassic climate. Abstract book, Bolzano, June 3–7, 2008*: 23–24.
- HORNUNG, T., KRZYSTYN, L. & BRANDNER, R. 2007: Tethys-wide mid-Carnian (Upper Triassic carbonate productivity decline: Evidence for the Alpine Reingraben Event from Spiti (Indian Himalaya)? *J. Asian Sci.* 30: 285–302.
- JAMNIK, A. & RAMOVŠ, A. 1993: Holoturijski skleriti in konodonti v zgornjekarnijskih (tuvalskih) in norijskih apnencih osrednjih Kamniških Alp (*Holothurian sclerites and conodonts in the Upper Carnian (Tuvalian) and Norian Limestones in the Central Kamnik Alps*). *Geologija (Ljubljana)* 35: 7–63.
- JELEN, B. & KUŠEJ, J. 1982: Quantitative palynological analysis of Julian clastic rocks from the lead-zinc deposit of Mežica. *Geologija (Ljubljana)* 25: 213–227.
- JURKOVŠEK, B. 1978: Biostratigrafija karnijske stopnje v okolici Mežice (*Biostratigraphy of the Carnian beds in the Mežica area*). *Geologija (Ljubljana)* 21: 173–208.
- JURKOVŠEK, B. & KOLAR-JURKOVŠEK, T. 1997: Karnijski krinoidi iz okolice Mežice (*Carnian crinoids from the Mežica area*). *Razprave IV. Razreda SAZU (Ljubljana)* 38: 33–71.
- JURKOVŠEK, B., KOLAR-JURKOVŠEK, T. & JAECKS, G.S. 2002: Makrofavna karnijskih plasti mežiškega prostora (*Macrofauna of the Carnian beds in the Mežica area*). *Geologija (Ljubljana)* 45: 413–418.
- KAIM, A., JURKOVŠEK, B. & KOLAR-JURKOVŠEK, T. 2006: New associations of Carnian gastropods from Mežica region in the Karavanke Karavanke Mountains of Slovenia. *Facies* 52/3: 469–482.
- KOLAR-JURKOVŠEK, T., GAZDZICKI, A. & JURKOVŠEK, B. 2005: Conodonts and foraminifera from the "Raibl Beds" (Carnian) of the Karavanke Mountains, Slovenia: stratigraphical and paleontological implications. *Geol. Quart.* 49/4: 429–438.

- KOLAR-JURKOVŠEK, T. & JURKOVŠEK, B. 2003: *Clypeina besici* Pantić (Chlorophyta, Dasycladales) from the "Raibl Beds" of the western Karavanke Mountains, Slovenia. *Geol. Carpath.* 54/4: 237–242.
- KOLAR-JURKOVŠEK, T. & JURKOVŠEK, B.: New paleontological evidence of the Carnian strata in the Mežica area (Karavanke Mts, Slovenia): Conodont data for the Carnian Pluvial Event. *Paleogeograph., Paleoclimatol., Paleocol.* (in print).
- KOLAR-JURKOVŠEK T., JURKOVŠEK B. & JAECKS, G. S. 2003: Carnian fauna from the Mežica Area, Slovenia. In: Piros, O. (Eds.): STS/IGCP 467 Field Meeting, I.U.G.S. subcommission Triassic stratigraphy. Veszprem, Hungary: 48.
- KOZUR, H.W. & BACHMANN, G.H. 2008: The mid-Carnian wet intermezzo of the Schlafsandstein (Germanic Basin). In: The Triassic climate. Abstract book, Bolzano, June 3–7, 2008: 30–32.
- KOLAR-JURKOVŠEK, T. 1991: Mikrofavna srednjega in zgornjega triasa Slovenije in njen biostratigrafski pomen (*Microfauna of Middle and Upper Triassic in Slovenia and its biostratigraphic meaning*). *Geologija* (Ljubljana) 33: 21–170.
- KOZUR, H. & MOCK, R. 1972: Neue Holothurien-Sklerite aus der Slowakei. *Geol. Paläont. Mitt. Innsbruck* 2/12: 1–47.
- KOZUR, H. & MOCK, R. 1974: Holothurien-Sklerite aus der Slowakei und ihre stratigraphische Bedeutung. *Geol. zbor.-Geol. Carp.*: 113–143.
- MOSTLER, H. 1968: Holothurien-Sklerite aus oberanisischen Hallstätterkalken. *Alpenkund. Stud., Ver. Univ. Innsbruck* 2: 1–36.
- MOSTLER, H. 1969: Entwicklungsreihen triassischer Holothurien-Sklerite. *Alpenkund Stud.* 7: 1–53.
- PAPŠOVA, J. & PEVNY, J. 1982: Finds of conodonts in Riefling limestones of the west Carpathians (the Choč and the Straža nappes). *Zapadne Karpaty, ser. Paleont.* 8, 77–90.
- PEVNY, J. 1981: Konodonti i holoturie triasu Stražovskej hornatiny. *Zemni plin a nafta* 26/4, 605–610, 891–915.
- PLACER, L. 1999: Contribution to the macrotectonic subdivision of the border region between Southern Alps and External Dinarides. *Geologija* (Ljubljana) 41 (1998): 223 – 255.
- PLACER, L., VRABEC, M. & TRAJANOVA, M. 2002: Kratke pregled geologije okolice Mežice. In: HORVAT, A., KOŠIR, A., VREČA, P., BRENČIČ, M., Vodnik po ekskurzijah, 1. slovenski geološki kongres, črna na Koroškem, 3–14.
- PUNGARTNIK, M., BRUMEN, S. & OGORELEC, B. 1982: Litološko zaporedje karnijskih plasti v Mežici (*Lithologic succession of Carnian beds at Mežica*). *Geologija* (Ljubljana) 25: 237–250.
- RIGO, M., PRETO, N., ROGLI, G., TATEO, F. & MIETTO, P. 2006: A rise in the carbonate Compensation Depth of western Tethys in the Carnian (Late Triassic): Deep-water evidence for the Carnian Pluvial Event. *Paleogeograph., Paleoclimatol., Paleocol.* 246 (2–4): 188–205.
- ROGLI, G., GIANOLLA, P., PRETO, N., MINARELLI, L. & PILATI, C. 2008: Palynology of the "Raibler Schichten" near Rubland (Austria) and comparison with other Upper Triassic palynofloras. In: The Triassic climate. Abstract book, Bolzano, June 3–7, 2008: 50.
- SCHLAGER, W. & SCHÖLLNBERGER, W. 1974: Das Prinzip stratigraphischer Wenden in der Schichtfolge der Nördlichen Kalkalpen. *Mitt. Geol. Ges.* 66–67: 165–193.
- SIMMS, M.J. & RUFFELL, A.H. 1989: Synchronicity of climatic change in the late Triassic. *Geology* 17: 265–268.
- ŠTRUCL, I. 1961: Geološke značilnosti mežiškega rudišča s posebnim ozirom na kategorizacijo rudnih zalog (*Geologische Verhältnisse der Lagerstätte Mežica mit besonderem Blick auf die Klassifizierung der Erzvorräte*). *Geologija* (Ljubljana) 6: 251–278.
- ŠTRUCL, I. 1971: On the geology of the eastern part of the northern Karawankes with special regard to the Triassic lead-zinc-deposits. In: Müller, G. (Eds.), *Sedimentology of parts of Central Europe*. VIII International Sedimentological Congress, Heidelberg, 285–301.
- TELLER, F. 1896: Erläuterungen zur Geologischen Karte der östlichen Ausläufer der Karnischen und Julischen Alpen (Ostkarawanken und Steiner Alpen). *Verhandlungen der geologischen Reichsanstalt Wien*: 1–262.
- ZANKL, H. 1966: Holothurien-Sklerite aus dem Dachsteinkalk (Obertrias) der Nördlichenkalkalpen. *Paläont. Z.* 40, 70–88.
- ZORC, A. 1955: Rudarsko geološka karakteristika rudnika Mežica (*Mining geological features of the Mežica ore-deposit*). *Geologija* (Ljubljana) 3: 24–80.

Mohorje Formation, Southern Slovenia

Mohorska formacija, južna Slovenija

Stevo DOZET

Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ul. 14, SI-1000 Ljubljana, Slovenija,
e-mail: stevo.dozet@geo-zs.si

Prejeto / Received 10. 2. 2009; Sprejeto / Accepted 7. 5. 2009

Key words: Stratigraphy, formation analysis, Carnian (Julian and Tuvalian), External Dinarides, Slovenia
Ključne besede: stratigrafija, formacijska analiza, karnij (jul in tuval), Zunanji Dinaridi, Slovenija

Abstract

In this paper a variegated and pretty heterogeneous development of the Carnian stratigraphic sequence with volcanoclastic rocks, we denominated as Mohorje Formation, has been researched and described. The new formation is subdivided in four members, namely: Boštetje Member, Borovnik Member, Rupe Member and Selo at Rob Member. In addition, the primary Carnian volcanism in the Rute Region has been examined in detail. The volcanoclastic succession (Borovnik Member) lies concordantly upon the black platy and bedded bituminous limestones with Carnian lamellibranchs. Transgressively over them and without visible signs of erosive or angle discordance repose typical red Carnian clastic rocks – dolomitic marlstones, quartz and jasper sandstones, conglomeratic sandstones and fine-grained breccioconglomerates, among which red dolomitic marlstones predominate. The Mohorje Formation lies concordantly upon the medium-grey to very light grey, nearly white, massive or thick-bedded, more or less dolomitized *Diplopora* Limestones of Cordevolian age conformably underlying Norian Main Dolomite with gastropods and megalodons.

Izveček

Opisan je razvoj karnijskega kamninskega zaporedja, ki je poimenovan kot Mohorska formacija. Predlagana formacija je razdeljena v štiri člene in sicer: boštetski člen, borovniški člen, ruparski člen in selanski člen. Poleg tega je detajlno raziskan karnijski vulkanizem na območju Rut. Vulkanoklastično zaporedje (borovniški člen) leži konkordantno na črnih ploščastih in plastnatih apnencih s karnijskimi školjkami. Transgresivno na vulkanoklastičnih kamninah leže brez vidnih znakov erozijske ali kotne diskordance rdeče karnijske kamnine – dolomitni laporovci, kremenovi in jaspisni peščenjaki, konglomeratični peščenjaki in drobnozrnati brečokonglomerati. Mohorska formacija leži konkordantno na srednje sivem do zelo svetlosivem neplastnatem in debeloplastnatem bolj ali manj dolomitiziranem diplopornem apnencu cordevolske starosti z algo *Diplopora annulata* in pod norijskim Glavnim dolomitom s polži in megalodonti.

Introduction

Several ten years ago we were persuaded, that in Slovenia volcanoes were active only in the middle ages of the Earth, the Ladinian epoch respectively. Then being volcanoes ejected lava i.e. volcanic balls, rubble, gravel, sand, ash and dust forming various volcanic rocks distinguishing one from the other with reference to colour and composition. Volcanic reddish brown, greenish grey and greyish green rocks such as keratophyres, quartz porphyrites and porphyry, originated from Ladinian lava, were commonly accompanied by various tuffs, compacted pyroclastic deposits of volcanic ash and dust.

Volcanic ash compacted in tuff rocks has been known for a long time in Carnian beds. Carnian

sediments with tuff interbeds and material are to be found in several places in central and southern Slovenia (GERMOVŠEK, 1955; DUHOVNIK, 1956; BERCE, 1962; RAMOVŠ, 1962; BUSER & HINTERLECHNER-RAVNIK, 1972), but a greater part of researchers believed, the tuffs in Carnian beds were all re-sedimented (LIPOLD, 1858; RAKOVEC, 1946; MLAKAR, 1959).

Consequently, the scope of our research work is to define and stratigraphically separate mappable lithologic units as well as to describe a rather colourfull and heterogeneous development of Carnian beds of the Mohorje shallow marine-volcanoclastic-sedimentary formation in the Rute area on Bloke plateau (central Slovenia), to collect new evidences for Carnian volcanism in this part of Slovenia, to establish and to describe lithofa-

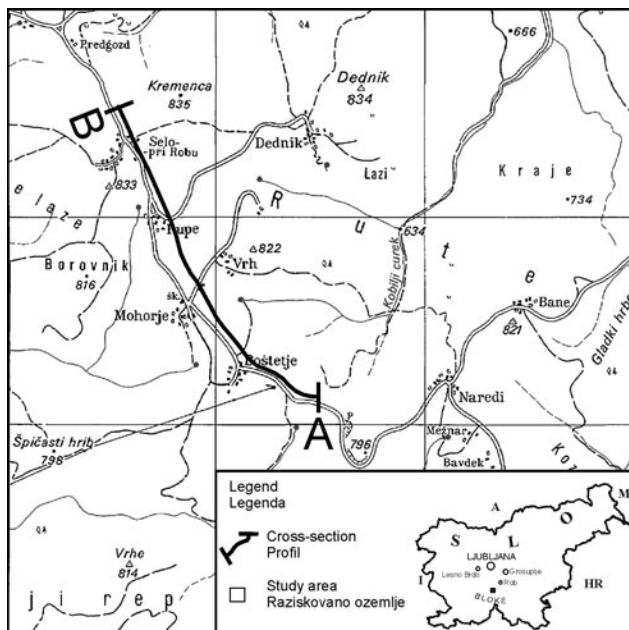


Fig. 1. Location sketch map of the study area and the cross-section through Carnian beds

Sl. 1. Položajna skica obravnavanega ozemlja in profil skozi karnijske plasti

cies of volcanoclastic series, to ascertain and to gather evidences for primary Carnian volcanism, as well as to find new data about eventual volcanoes, type of magma, volcanic eruptions, age of volcanism and to use the obtained data for elaboration of Geological Map of Slovenia on the scale of 1 : 50.000.

The study area (Fig. 1) includes several parts of central and southern Slovenia, the Dolenjsko region respectively. Otherwise expressed, it extends from Ljubljana in the north towards the south including Bloke, all lying in the Map Sheet Grosuplje on the scale 1 : 50.000.

The geological data used in this work have been collected during systematic regional mapping for the Geologic Map of Slovenia 1 : 50.000 as well as by stratigraphic measuring of several cross-sections, accompanied by systematic laboratory examinations in the two last years.

From the geotectonical point of view the study area belongs to the External Dinarides (BUSER, 1974, 1989; PLACER, 1998) extending from the Northern Italy across Slovenia towards Croatia. According to BUSER (1974) the considered area is a part of so-called Dolenjska-Notranjska Mesozoic Blocks. This area is built prevalently of Mesozoic rocks, which are cut by several fault systems. The most destroying fault system was the dinaric one (NW-SE). The boundary between the northern lying Southern Alps is of overthrust character, whereas the External Dinarides pass towards the northeast gradually into the pelagic Internal Dinarides (BUSER, 1989; OGORELEC & DOZET, 1997; PLACER, 1998).

Previous investigations

There are only a few published papers treating the Carnian volcanic activity in the southern and

central Slovenia and the most important ones are listed in the bibliography. On the basis of selected papers some definite conclusions can be noted, but it is difficult or even impossible to formulate them precisely, because they are based on different approaches and statements.

The differences exist, first of all, in the determination of age of the Triassic volcanic activity in the southern and central Slovenia. The fact is, the Carnian volcanism in Slovenia is much less examined than the Middle Triassic one. Tuff rocks in the Carnian beds are, otherwise, often remarked and noted, but in opinion of greater part of researchers they were all resedimented from older Ladinian rocks (RAKOVEC, 1946). In his pioneer work on Triassic volcanism, the above-mentioned author quoted all up to that time known literary data and very precisely worked out traces of volcanism in Slovenia. A short review of igneous and metamorphic rocks in Slovenia has been presented by DUHOVNIK (1956). GRAFENAUER and coworkers (1983) researched the Triassic igneous rocks in Eastern Slovenia. Afterwards, GRAFENAUER (1985) explained the origin of Triassic igneous rocks in Slovenia. They have properties of spilitic keratophyre association. According to GRAFENAUER (1985) among the eruptive rocks in Slovenia liparitic and dacitic lavas predominate over andesitic and basaltic ones. Felsitic rocks were emplaced often during violent explosive activities, while the mafic rocks effused to the surface in a quieter way. Lavas flowed at times on land and often into the sea.

JELEN (1990) determined the Carnian bivalve mollusc macrofauna from the locality Lesno Brdo near Drenov Grič. The same year JURKOVŠEK and JELEN (1990) presented a short supplement to the up to that time knowledge of the fossil lamelli-branch fauna from the Carnian beds at Orle near Ljubljana.

Materials and methods

This work is based on data collected during detailed geological mappings, systematic regional geological mapping and stratimetric profilings of the area. The field mapping has been carried out on topographic maps on the scale of 1 : 10.000. Various correlating methods have been used as well. The carbonate rocks are classified according to FOLK'S (1959) and DUNHAM'S (1962) and clastic rocks considering the PETTILJOHN'S (1975) classification. Starting material for our research work was the Basic Geological Map of Slovenia 1 : 100.000, the Map Sheet Ribnica with its explanatory text (BUSER, 1969, 1974).

Stratigraphy

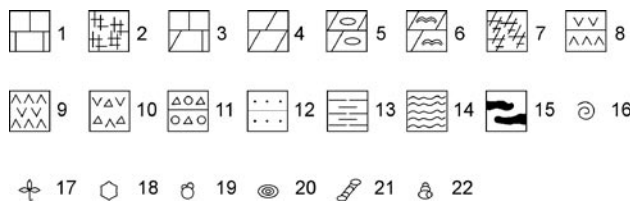
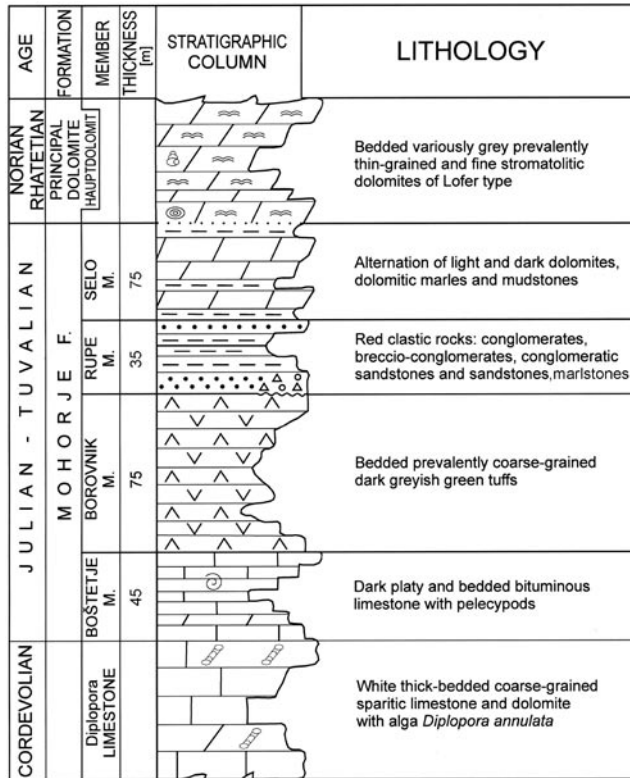
Julian and Tivalian

Mohorje Formation

Previous work and statements. The pioneer merits and best results by the discovering of Carnian

volcanism on the Bloke plateau and in southern Slovenia had the scientists BUSER and HINTERLECHNER-RAVNIK (1972), who researched and described the sedimentary succession of the Carnian beds with repeated sequences of pelitic to very coarse-grained tuffs in the Rute area on Bloke plateau. With respect to the size of tuff particles and regarding the texture of the examined material, they

distinguished pelitic, vitroclastic (0,1–0,3 mm) and crystalline-lithoclastic tuffs. As an evidence that the tuff series is not resedimented, they alleged pretty numerous, typical and well-shaped fragments of vitroclastic tuff as well as the fact, the relatively soft and numerous hypidiomorphic and idiomorphic plagioclase crystals do not show any traces of roundness. The volcanic material is in some places mixed with a sedimentary one. The plagioclase belonged to andesine. The most albitized sample was chemically analysed and belonged according to Niggli's parameters to an alcaligranitic and alcalisyeniticaplitic (albitic) magma. Therefore, they added nonaltered tuffs to porphyry (plagioclase) tuffs. The two authors concluded, that although there were no primary magma volcanic rocks, the primary and nonresedimented tuffs are sufficient evidence for Carnian volcanism in southern Slovenia.



EXPLANATION

- 1 – Bedded limestone, 2 – massive limestone, 3 – dolomitized limestone, 4 – bedded dolomite, 5 – nodular dolomite, 6 – stromatolitic dolomite, 7 – massive dolomite, 8 – platy and bedded tuff, 9 – massive tuff, 10 – tuff breccia, 11 – breccioconglomerate, 12 – bedded sandstone, 13 – marlstone, 14 – shaly mudstone, 15 – anthracite, 16 – macrofauna, 17 – macroflora, 18 – microflora, 19 – microfauna, 20 – onkoidi tipa “Sphaeracodium” type, 21 – Dasycladaceae, 22 – gastropods.

LEGENDA

- 1 – Plastnat apnenec, 2 – masiven apnenec, 3 – dolomitiziran apnenec, 4 – plastnat dolomit, 5 – gomoljast dolomit, 6 – stromatoliten dolomit, 7 – masiven tuf, 8 – ploščast in plastnat tuf, 9 – masiven tuf, 10 – tuška breča, 11 – brečokonglomerat, 12 – plastnat peščenjak, 13 – laporovec, 14 – skrilav glinavec, 15 – antracit, 16 – makrofavna, 17 – makroflora, 18 – mikroflora, 19 – mikrofavna, 20 – onkoidi tipa “Sphaeracodium”, 21 – Dasycladaceae, 22 – polži.

Stratotype and the name of formation. In the northeastern edge of the Bloke plateau in the Rute area several cross-sections of Carnian beds, which we due to a typical development, denominated as Mohorje shallow water-volcaniclastic beds, for short Mohorje Formation, have been researched. The most complete and typical cross-section of these beds is well-exposed in Rute, the area on the northern margin of the Bloke plateau, comprising the small villages Boštetje, Mohorje, Rupe, Selo, Vrh, Neredi, Zgonče and Logarji. Thus, the considered new formation has obtained its name according to Mohorje, lying in the centre of the Rute area.

Stratigraphic position. The stratigraphic sequence of sedimentary and volcanic rocks, denominated Mohorje Formation (Fig. 2), lies concordantly upon the thick-bedded and massive prevalently light grey carbonate rocks with numerous dasycladaceans. Among them the species *Diplopora annulata* SCHAFFHÄUTL and *Diplopora annulatisima* PIA are wide-spread. The original sediment is thick-bedded biostromal *Diplopora* Limestone, that was changed by late diagenesis at some places in more or less dolomitized limestone, and at other places into the late diagenetic Cordevolian dolomite. The Mohorje shallow water-volcaniclastic rocks are overlain conformably by loferitic (FISCHER, 1964) Main Dolomite containing rare interbeds of oncolitic dolomites and lumachelles with megalodontids (*Neomegalodon*, *Magalodus*) as well as gastropods (*Worthenia*).

Carnian beds south, west and east of the Ljubljana Moor have been described by RAMOVŠ (1953), GERMOVŠEK (1955), RAKOVEC (1955), BUSER (1965, 1974), RIBIČIČ (1973) and DOZET (1978, 1979). Hitherto, traces of Carnian volcanism in Slovenia were detected by BERCE (1962), RAMOVŠ (1962), BUSER (1962, 1966) BUSER & RAMOVŠ (1966), and BUSER & HINTERLECHNER-RAVNIK (1972).

Fig. 2. Mohorje Formation, its lithology, dismembering and stratigraphic position

Sl. 2. Mohorska formacija, njena litološka sestava, razčlenitev in stratigrafska lega

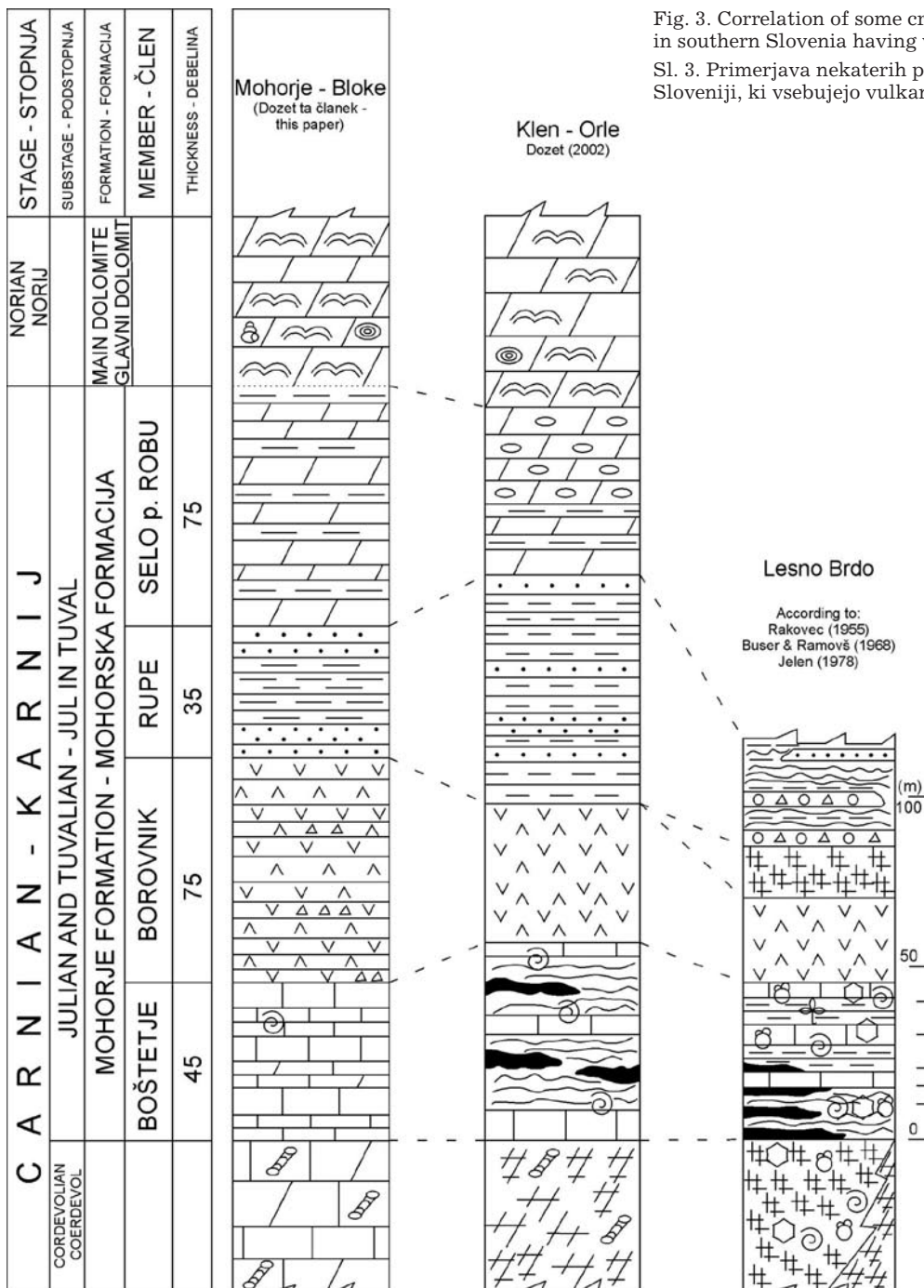


Fig. 3. Correlation of some cross-sections of Carnian beds in southern Slovenia having volcanoclastic member

Sl. 3. Primerjava nekaterih profilov karnijskih plasti v južni Sloveniji, ki vsebujejo vulkanoklastični člen

Lithostratigraphic dismembering

Rock succession of the Mohorje Formation consists of carbonate, clastic and volcanoclastic rocks. Among sedimentary rocks various limestones and marls are present, but there are dolomites, conglomerates, breccio-conglomerates, sandstones and shaly claystones as well. Conglomerates and sandstones occur in the form of rare interbeds in the upper part of the Carnian lithological column. With reference to the Mohorje Formation and considering the rules of superposition this stratigraphic sequence can be separated into four lithostratigraphic members, namely: Boštetje Member, Borovnik Member, Rupe Member and Selo at Rob Member.

Boštetje Member: dark platy and bedded bituminous limestones (predominate), dolomites and cherts

Description. The basal member of the Mohorje Formation (Fig. 4) got its name according to the small village Boštetje. It consists of 45 to 75 metres thick rather monotonous packet of platy and bedded micritic and sparitic bituminous limestones, dolomitized limestones and dolomites (rarely), that are often fine-laminated and/or banded. The lamination occurs due to different granularity of rocks, different contents of organic substance and because of dolomitization of coarser-grained laminae.

Fossils and age. In the limestones fossil remains have been found in the Rute area. However, more macrofossils in dark marlstones and limestones have been found in an equivalent development in the cross-section between Drenov Grič and Lesno Brdo. HAUER (1857), KOSSMAT (1910), WAAGEN (1907), RAKOVEC (1955) and JELEN (1990) described the following more or less typical Carnian lamelibranchs there: *Trigonodus carniolicus* BITTNER, *T. problematicus problematicus* (KLIPSTEIN), *T. bittneri* WAAGEN, *T. serianus* PARONA, *T. rablensis* (GREDLER), *Myophoria kefersteini kefersteini* (MÜNSTER), *M. kefersteini gornensis* VARISCO, *M. kefersteini lombardica* (WAAGEN), *M. kefersteini typica* WAAGEN, *Heminajas woehrmanni* WAAGEN, *Bakevella (Bakevelloides) bouei* (HAUER), *Lopha montiscaprilis* (KLIPSTEIN), *Pachycardia rugosa* HAUER and *Myophoricardium lineatum* WÖHRMANN. In the thick-bedded biomicritic limestone from Lesno Brdo the calcareous algae *Cypeina besici* PANTIĆ was found as well. Much less has been known and noted down on fossil lamelibranch findings in the Carnian limestones and marls from the abandoned coal-mine Klen at Orle near Ljubljana, where SEDLAR et al. (1948), RAKOVEC (1955) as well as JURKOVŠEK and JELEN described and quoted the following species: *Trigonodus carniolicus* BITTNER, *T. problematicus problematicus* (KLIPSTEIN), *T. bittneri* WAAGEN, *T. abdominalis* JELEN, *Myophoria kefersteini lombardica* (WAAGEN), *M. kefersteini gornensis* VARISCO, *M. kefersteini kefersteini* (MÜNSTER), *M. kefersteini typica* WAAGEN and *Pachycardia rugosa* HAUER.

Environment. Carnian lamelibranchs collected in the alternating sedimentary succession of micritic and biomicritic (foraminifers, algae, molluscs) limestones, silty marlstones as well as shaly and marly mudstones originated in a restricted shelf, a temporary lagoon respectively, with temporary supply from the Carnian land.

Borovnik Member: tuffs, peperites, tuffites

Description. This member is denominated according to 795 metres high Borovnik hillock, built of Carnian tuffs (Fig. 5), that are most exposed in the small pretty deep Borovnik Ravine. The Borovnik hillock is built of 75 metres thick stratigraphic sequence of various volcanoclastic platy, bedded and massive volcanic rocks of pelitic, psammitic and pefitic texture. In the relatively deep small valley between Borovnik (785 m) and the hillock 816 m, pelitic, fine-grained and medium-grained tuffs alternate with coarse-grained tuffs and fine tuff breccias belonging to medium-acid igneous rock. With reference to the grade of weathering the volcanoclastic tuffs of Borovnik occur in various shade of black and green colour.

The Borovnik Member begins with a small rhyolitic lava flow that underwent mixing with a wet unconsolidated silt. Overlying pyroclastic sequence is fining-upward and consists of bedded and laminated coarse- and fine-grained rhyolitic tuffs. The magma underwent strong fractionation;



Fig. 4. Dark, platy and bedded often laminated bituminous Carnian limestone (Boštetje Member)

Sl. 4. Temen, ploščast in plastnat, često laminiran bituminozen karnijski apnenec (boštetski člen)

plagioclase and alkali feldspar phenocrysts were accumulated in the late volcanic magmas and imparted them virtual dacitic character. The late-stage dacitic magmas were emplaced as shallow intrusives and underwent mixing with unconsolidated surrounding sediments and tuffs producing dacite/siltstone and dacite/rhyolitic tuff peperites. The peperite composition depends on the quantity of admixed sediment and differs from dacitic composition in the abundance of major oxides and trace elements.



Fig. 5. Alternation of Carnian tuffs of various granulation in the Borovnik Ravine in the Rute area (Bloke Plateau). The tuffs belong to the Borovnik Member of the Mohorje Formation

Sl. 5. Menjavanje karnijskih tufov različne zrnivosti v grapi pod Borovnikom na območju Rut (Bloška planota). Tufi pripadajo borovniškemu členu Mohorske formacije

Petrographical, geochemical and lithological composition as well as Bloke Carnian volcanism are described more in detail in the article of KRALJ and DOZET (this volume).

Rupe Member: Red clastic rocks – conglomerates, breccioconglomerates, conglomeratic sandstones, sandstones, sandstones, dolomitic marlstones

Description. The third member of Mohorje Formation is denominated according to the hamlet Rupe, where in the upper part of the small and pretty steep ravine the contact between the underlying volcanoclastic succession and transgressively overlying succession of variegated, prevalently red clastic rocks (Fig. 6) is exposed. Among clastics prevail greyish red dolomitic marlstones. Gay-coloured conglomerates, breccio-conglomerates, conglomeratic sandstones as well as coarse- and very coarse-grained sandstones appear in the form of up to several metres thick interbeds in the lowermost and middle part as well as just in the uppermost part of the red clastic succession (Rupe Member). Psammitic and psefitic interbeds are thick-bedded and rarely thin-bedded or thick-plateled. The thickness of the Rupe Member varies from 35 to 50 metres.

Variegated calcareous-tuff rudites (conglomerates, breccias) are composed of rosy, reddish and red fragments of various size (up to 1,0 cm). Most fragments are microcrystalline calcite. Pretty numerous are also silicate lithic fragments (microcrystalline and fine-grained volcanic glass and fragments of vein quartz). Lithic fragments are rounded or completely irregular (angular). Next to lithic fragments there are quartz and feldspar grains (0,2 mm – 0,5 mm) in the considered rocks as well. Feldspars are pretty changed kaolinized and impregnated with limonite dust. They belong to acidic plagioclases.

The calcareous-tuff sandstones have a similar composition like afore-described rudites. They are different only in the fact that in the calcareous breccias and conglomerates limestone fragments are predominant, while in the sandstones fragments of silicate tuff material prevail.

In the dolomitic marlstones in some places up to several meters thick interbeds of very compact dolomitic marlstone with numerous up to several centimeters big nodules composed of grayish, greenish grey, bluish grey and rosy limestone can be found. These are, in fact, limestone concretions in the dolomitic marlstone. For the dolomitic marlstones is very typical a splinter disintegration as well.

Environment. Heterogeneity of red Carnian sediments indicates an erosion of uplifted parts of shortlived dry land, after which followed a transgression and sedimentation of red Carnian sediments, which was in the beginning under strong influence of the dry land.

In the sedimentary basin, at first, gravelly and coarse-grained sandy material was transported from the dry land with an agitated relief and se-



Fig. 6. Red bedded and platy Carnian clastic rocks (quartz and jasper sandstones and breccioconglomerates) of the Rupe Member of Mohorje Formation.

Sl. 6. Rdeči plastnati in ploščasti karnijski klastiti (kremenovi in jaspisni peščenjaki in brečokonglomerati) ruparskega člena Mohorske formacije

miarid climate. Geologic events and processes on the dry land gradually calmed, the relief lowered, the transgression progressed and the influence of the dry land on the sedimentation was reduced.

Very coarse-grained clastic sediments were followed by more and more fine-grained terrigenous material, especially silt and clay, that was mixed with increasing carbonate prevalently dolomite sedimentation, that in the Norian stage entirely prevailed.

Selo at Rob Member: Yellowish grey dolomitic marlstones and mudstones, clayey and marly dolomites

Description. Red clastic Carnian rocks do not pass upwards directly into the Main Dolomite, but there is between both still from 35 to 75 metres thick stratigraphic sequence of alternating clayey dolomite, dolomitic marlstone, marly dolomite as well as shally and limy marlstone (Fig. 7). The member got his name according to the small village Selo at Rob. Dolomites are more or less clayey or marly, brownish, yellowish or medium grey. Limy and shally marlstones are yellowish and medium grey, gently pinkish grey, yellowish orange to medium-dark grey. If soft, they can be very dark grey. Upwards, the considered alternating sediments pass gradually into the bedded sparitic, intrasparitic and fine-stromatolitic Main Dolomite with rare horizons of oncolitic dolomite.

Fossils and age. In transitional Carnian beds no fossil remains have been found in the Bloke cross-



Fig. 7. Selo at Rob Member: Alternation of pale brownish and yellowish grey bedded dolomite with stick paralepipiped disintegration and yellowish brownish and greenish grey to medium dark grey dolomitic marlstones in the Rute area (Bloke plateau)

Sl. 7. Selanski člen: Menjavanje blede rjavkasto- in rumenkastosivega plastnatega dolomita s paličasto paralepipipedsko krojivijo ter rumenkasto, rjavkasto in zelenkasto sivih do srednje temnosivih dolomitnih laporovcev na območju Rut (Bloška planota)

sections. These beds are, as a rule, very scarce of fossils elsewhere in southern Slovenia as well. In the transitional Carnian beds of southern Slovenia fossils have been found, hitherto, only in the central part of Dolenjska (BUSER, 1974). This author discovered a lumachelle with megalodontids among which Vegh-Neubrandt determined the species *Neomegalodon (Rossiodus) arthaberi* Kutassy that ranges the considered transitional beds in the Tuvallian substage.

Correlations and Discussion

The cross-section, where the Julian-Tuvallian lithologic column consists in the lower part of dark to black platy and bedded limestones, in the middle part of volcanoclastic rocks and in the upper part of red clastic rocks is not an unique case in southern Slovenia, on the contrary, it occurs in adjacent and wider surroundings of the Rute area, and even more, similar cross-sections can be found in other places in Rute as well.

Pretty similar cross-section as at Mohorje is exposed (Fig. 3) along the road Drenov grič-Lesno Brdo (JELEN, 1990). Discordantly upon the Cordevolian massive limestone with algae *Diplopora annulata* SCHAFFHÄUTL repose there grey silty and sandy marlstone, mudstone, siltstone and cross-bedded fine sandstone with bauxitic oolites, conglomeratic breccia and anthracite at the base (Figs. 3, 4). The lowermost Julian rocks are overlain by the grey thick-bedded spary limestone, biomicrite, with alga *Clypeina besici* PANTIČ, as well as marlstone and shaly mudstone. These beds are rich in lamellibranch macrofauna. Upwards follow the Julian green tuffaceous sandstone and black shaly marlstone.

Nearly alike cross-section of the Carnian beds as at Lesno Brdo is exposed in the Grosuplje and Klen-Orle coal-mine surroundings (Fig. 3). In the lower Grosuplje-Orle paralic-shallow water dark limestone member the lamellibranchs *Trigonodus carniolicus* BITTNER, *T. bittneri* WAAGEN, *T. abdo-*

minalis WAAGEN, *T. problematicus problematicus* (KLIPSTEIN), *Pachycardia rugosa* HAUER and *Myophoria kerfersteini* MÜNSTER have been determined (PETRASCHECK, 1927; SEDLAR et al., 1948; JURKOVŠEK & JELEN, 1990). Lithostratigraphically, the Grosuplje-Orle Beds are subdivided in five members (DOZET, 2002): basal dark limestone and marlstone with anthracite, fossiliferous limestones with tuffitic and marly interlayers, dark greyish green tuffs, red clastic rocks and transitional dolomite-marlstone sequence passing upwards gradually into the Main Dolomite (Hauptdolomit).

The stratigraphic sequence of Carnian beds resembling to the Mohorje one is exposed also in the Bajdinski potok at Turjak, where between the black bedded limestone and red clastic rocks there is several ten metres thick horizon of strongly weathered orange brown tuff as well. The same succession of Carnian members can be observed in the valley of Črni potok south of Rob and in Črni potok south of Mala Slevca at Dvorska vas. In the lower part of Julian-Tuvallian succession there is a black, bedded limestone with chert. Upwards follow volcanoclastic rocks and in the upper part, there are red clastic rocks passing upwards into the Main Dolomite. Somewhat different was the coarse of sedimentation in the Zgonče-Vintarji-Perovo area, where the volcanoclastic rocks repose directly upon the Cordevolian carbonate rocks with diploporas (BUSER, 1969, 1974).

In Carnian stratigraphic sequence in the Idria area CIGALE (1978) distinguished five members (from bottom to top). The brownish grey dolomite, dark grey limestone and the first Carnian clastic horizon are assigned to the Julian substage. They are overlain by the light grey ribboned limestone and the second Carnian clastic horizon belonging both to the Tuvallian substage. The Carnian-Norian geologic boundary is transitional in nature.

Finally, primary Carnian volcanoclastic rocks between the underlying dark bedded and platy bituminous limestones and overlying red clastic rocks are recorded in the cross-sections Zgonče-Kobilji curek and along the road Rob-Selo too.

The superposition of typical Carnian lithological units, the concordant stratigraphic position between the overlying Main Dolomite with gastropods and megalodonts and underlying coarse crystallized Cordevolian dolomite with diploporas and other dasyclads, the stratigraphic position of the volcanoclastic rocks, their petrography and geochemistry, analogy and correlation of the considered cross-section with other southern Slovenia Carnian much more fossiliferous cross-sections, give us enough evidences for the Carnian (Julian a. Tuvalian) age of the Mohorje Formation, its volcanoclastic Borovnik Member and Carnian volcanism.

Conclusions

About 230 metres thick stratigraphic sequence of sedimentary and volcanoclastic rocks of Julian and Tuvalian (Middle and Upper Carnian) age in the Rute area on the northeastern margin of Bloke plateau (Dolenjska, central Slovenia) is denominated after the small village Mohorje "Mohorje shallow marine-volcanoclastic beds", for short "Mohorje Formation".

From the lithostratigraphic point of view the Mohorje Formation is subdivided in four members (from bottom to top): Boštetje Member, Borovnik Member, Rupe Member and Selo at Rob Member.

The considered formation is in lowermost part composed of dark to black, platy and bedded, laminated, micritic and sparitic limestones, here and there with cherts (Boštetje Member), passing upwards into the prevalently black and green volcanoclastic tuffs (Borovnik Member). Volcanoclastic rocks are transgressively overlain bei variegated prevalently red clastic sediments – quartz and jasper sandstones and conglomerates as well as dolomitic marlstones (Rupe Member). In the uppermost part of the Mohorje Formation yellowish grey dolomites, dolomitic marlstones, clayey dolomites as well as shaly and marly mudstones alternate passing upwards gradually into the Main Dolomite – Hauptdolomit (Selo at Rob Member).

The age of the Mohorje Formation is defined on the basis of concordant position between the underlying Cordevolian and overlying Norian carbonate rocks, further on, with respect to sedimentological characteristics of individual members and according to the correlation with similar Carnian cross-sections in southern Slovenia having richer contents of index-fossils. In the underlying Cordevolian carbonate rocks the dasyclad *Diplopora annulata* Schafhäütl has been determined and in the overlying Norian Main Dolomite the gastropods *Worthenia* cf. *solitaria* Benecke and *Worthenia* cf. *escheri* Stoppani as well as megalodont bivalves *Neomegalodon* (*Neomegalodon*) *complanatus* Gümbel and *Megalodus* sp. have been collected.

The total thickness of the Mohorje Formation varies from 205 to 265 metres. Individual members have the following thickness: Boštetje Member 45–75 metres, Borovnik Member 75 metres, Rupe Member 35 to 50 metres and Selo at Rob Member 35–75 metres.

With reference to sedimentological and paleontological data the considered area was a part of a restricted shelf, sometimes with a lagoon character and episodically with volcanic eruptions.

Acknowledgements

The geological field researches were performed in the frame of programme group "Regional Geology (P1 0011), financially supported by Slovenian Research Agency.

Povzetek

- Okoli 230 m debelo zaporedje sedimentnih in vulkanoklastičnih kamnin julsko-tuvalske starosti na območju Rut na severovzhodnem robu Bloške planote smo po kraju Mohorje poimenovali Mohorske plitvodno-vulkansko-sedimentne plasti, oziroma Mohorska formacija.
- Mohorsko formacijo smo v litostratigrafskem pogledu razdelili na štiri člene (od spodaj navzgor): 1) – boštetski člen, 2) – borovniški člen, 3) – ruparski člen in 4) – selanski člen.
- Obravnavana formacija je v spodnjem delu sestavljena iz črnih ploščastih in plastnatih mikritnih, laminiranih in sparitnih apnencev ter apnencev z roženci (boštetski člen), ki navzgor prehajajo v pretežno črnozeleno vulkanske klastite (borovniški člen). Nad vulkanskimi klastiti leže transgresivno pisani, pretežno rdeči klastični sedimenti (ruparski člen), v vrhnjem delu formacije pa se menjavajo rumenkastosivi dolomiti, dolomitni laporovci in skrilavi glinavci (selanski člen), ki prehajajo navzgor postopno v Glavni dolomit.
- Borovniški člen, ki vsebuje vulkanoklastične kamnine, leži konkordantno in brez znakov prekinitve sedimentacije na črnih apnencih in laporovcih s školjkami, ki so uvrščeni v boštetski člen, in konkordantno pod rdečimi klastiti, ki pripadajo ruparskemu členu Mohorske formacije.
- Mohorsko sedimentno, karbonatno in vulkansko zaporedje leži konkordantno na apnencih, dolomitiziranih apnencih in dolomitih s preseki diplopor in drugih dazikladacej, navzgor pa postopno prehaja v Glavni dolomit z redkimi onkolitnimi horizonti, megalodonti in polži.
- Starost mohorskih plasti je določena na podlagi konkordantne lege med cordevolskimi diplopornimi (*Diplopora annulata* Schafhäütl) karbonatnimi sedimenti in Glavnim dolomitom s horizonti onkoidov tipa "*Sphaerocodium bornemanni*", polžema *Worthenia* cf. *solitaria*, Benecke in *Worthenia* cf. *escheri* Stoppani ter megalodonti *Neomegalodon* (*Neomegalodon*) *complanatus* Gümbel in *Megalodus* sp.
- Skupna debelina mohorskih plasti se giblje od 205 m do 265 m, posamezni členi pa imajo sledeče debeline: boštetski člen 45–75 m, borovniški člen 75 m, ruparski člen 35 m do 50 m in selanski člen 35 m do 75 m.
- Po sedimentoloških in paleontoloških podatkih sklepamo, da je bilo obravnavano ozemlje del

zaprtega šelfa oziroma lagune z občasnimi vulkanskimi erupcijami.

References

- BERCE, B. 1962: Rasčlanjavanje trijasa u zapadnoj Sloveniji. Ref. 5. savet. Savez geol. društ. FNRJ Jugosl. (Beograd) 1: 155–162.
- BUSER, S. 1962: Razvoj triadnih skladov v Slovenskih Dinaridih. Ref. 5. savet. Savez. geol. društ. FNRJ Jugosl. (Ljubljana) 1: 163–166.
- BUSER, S. 1965: Geološka zgradba južnega dela Ljubljanskega barja in njegovega obrobja (*Geological structure of the Ljubljana Moor with special regard to its southern Borderland*). Geologija (Ljubljana) 8: 34–57.
- BUSER, S. 1969: Osnovna geološka karta SFRJ, list Ribnica 1 : 100.000. Zvez. geol. zav., Beograd.
- BUSER, S. 1974: Tolmač lista Ribnica L 33–76. Osnovna geološka karta SFRJ 1 : 100.000. Zvez. geol. zav. (Beograd): 1–60.
- BUSER, S. 1989: Development of the Dinaric and Julian Carbonate Platforms and of the intermediate Slovenian Basin (NW Yugoslavia). Mem. Soc. Geol. Ital. (Roma) 40(1987): 313–320.
- BUSER, S. & HINTERLECHNER-RAVNIK, A. 1972: Sledovi karnijskega vulkanizma v južni Sloveniji. 7. Geol. Kongr. Savez. geol. društ. Jugosl. (Zagreb) 1: 113–119.
- BUSER, S. & RAMOVŠ, A. 1968: Razvoj triadnih skladov v slovenskih Zunanjih Dinaridih. Ref. 5. savet. Savez. geol. društ. FNRJ Jugosl. (Beograd) 1: 33–42.
- CIGALE, M. 1978: Karnijske plasti v okolici Idrije (*Carnian beds in the Idrija region*). Geologija (Ljubljana) 21: 61–75.
- CIGALE, M., RAMOVŠ, A. & VÉGH-NEUBRANDT, E. 1976: *Triadomegalodon idrianus* n.sp. aus dem Oberkarn bei Idrija. Geologija (Ljubljana) 19: 29–33.
- DOZET, S. 1978: Biostratski razvoj triasnih plasti na listu Postojna. Magistrsko delo. Univerza v Ljubljani: 1–126.
- DOZET, S. 1979: Karnijske plasti južno in zahodno od Ljubljanskega barja (*Carnian beds south and west of the Ljubljana Moor*). Geologija (Ljubljana) 22/1: 55–70.
- DOZET, S. 2002: Grosupeljsko-Orelske paralično-plitvovodne plasti (*Grosuplje-Orle paralic-shallow water beds*). RMZ, Mater. & Geoenviron. (Ljubljana) 49/4: 571–591.
- DUHOVNIK, J. 1956: Pregled magmatskih in metamorfnih kamenin Slovenije (*Review of igneous and metamorphic rocks in Slovenia*). Prvi jugosl. geol. kongr. (Ljubljana) 1: 23–26.
- DUNHAM, R.J. 1962: Classification of carbonate rocks according to depositional texture – In HAM, W.E. (ed.): Classification of carbonate rocks, a symposium. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Memoir (Tulsa, Oklahoma) 1: 108–122.
- FISCHER, A.G. 1964: The Lofers cyclothems of the Alpine Triassic. In Meeriam D.F. (ed.): Symposium on cyclic sedimentation. Kansas Geol. Survey Bull. (Lawrence) 169/1: 107–149.
- FOLK, R. 1959: Practical petrographic classification of limestones. Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol. (Tulsa, Oklahoma) 43/1: 2–38.
- GERMOVŠEK, C. 1955: Poročilo o kartiranju južno-vzhodnega obrobja Ljubljanskega barja (*Note on the geological mapping of the Southeastern margin of the Ljubljana Moor*). Geologija (Ljubljana) 3: 235–239.
- GRAFENAUER, S. 1980: Petrologija triadnih magmatskih kamnin na Slovenskem (*Petrology of Triassic igneous rocks in Slovenia*). Razprave 4. razr. SAZU (Ljubljana) 25: 1–220.
- GRAFENAUER, S. 1985: Nastanek triasnih magmatskih kamnin na Slovenskem (*Origin of Triassic igneous rocks in Slovenia*). Razprave 4. razr. SAZU (Ljubljana) 26: 387–400.
- GRAFENAUER, S., DUHOVNIK, J. & STRMOLE, D. 1981: Magmaške kamnine v zahodnih Karavankah (*Igneous rocks in Western Slovenia*). Rud. met. zbornik (Ljubljana) 28/2–3: 127–150.
- GRAFENAUER, S., DUHOVNIK, J. & STRMOLE, D. 1983: Triadne magmaške kamnine vzhodne Slovenije (*Triassic igneous rocks of Eastern Slovenia*). Geologija (Ljubljana) 26: 189–241.
- HAUER, F. 1857: Ein Beitrag zur Kenntniss der Fauna der Raibler Schichten. Sitzung Ak. Wiss. Mat. Nat. Cl. (Wien) 24/3: 537–566.
- JELEN, B. 1990: Karnijska školjčna favna na Lesnem brdu in njen paleobiološki pomen (*Carnian bivalves (Mollusca) from Lesno Brdo, Slovenia, NW Yugoslavia and their paleobiological significance*). Geologija (Ljubljana) 3/32: 11–127.
- JURKOVŠEK, B. & JELEN, B. 1990: Fosilne školjke iz karnijskih plasti pri Orlah (*Fossil lamellibranchs from the Carnian beds at Orle*). Geologija (Ljubljana) 31/32: 129–132.
- KOSSMAT, F. 1898: Die Triasbildungen der Umgebung von Idra und Gereuth. Verh. Geol. R.-A. (Wien): 86–105.
- KOSSMAT, F. 1913: Die Adriatische Umrandung in der alpinen Faltenregion. Mitt. Geol. Ges. (Wien) 6: 61–165.
- KRALJ, P. 1996: Lithofacies characteristics of the Smrekovec volcanoclastics, Northern Slovenia. Geologija (Ljubljana) 39: 159–191.
- KRALJ, P., DOZET, S. 2009: Volcanic succession of the Borovnik Member (Mohorje Formation) Bloke plateau area, Central Slovenia. Geologija (Ljubljana) 52/1: this volume.
- LIPOLD, M.V. 1858: Bericht über die geologische Aufnahme im Unter-Krain im Jahre 1857. Jb. Geol. R.-A. (Wien): 257–276.
- MLAKAR, I. 1959: Geološke razmere idrijskega rudišča in okolice (*Geologic features of the Idrija mercury deposit*). Geologija (Ljubljana) 5: 164–179.
- MLAKAR, I. 1969: Krovna zgradba žirovskega ozemlja (*Nappe structure of the Idrija-Žiri Region*). Geologija (Ljubljana) 12: 5–72.
- OGORELEC, B. & DOZET, S. 1997: Zgornjetriasne, jurske in spodnjekredne plasti v vzhodnem delu Posavskih gub – Profil Laze pri Boštanjju (*Upper Triassic Jurassic and Lower Cretaceous beds in Eastern Sava Folds – Section Laze at Boštanj*).

- Slovenia*). Rud. met. zbornik (Ljubljana) 44/3-4: 223-235.
- PETRASCHECK, W. 1927: Die Kohlanlager südlich der Save in Krain. Zeitschrift des Oberachlesischen Berg-u. Hütten männischen Vereins zu Katowice (Katowice).
- PETTJOHN, F.J. 1975: Sedimentary rocks. Harper and Row (New York): 1-628.
- PLACER, L. 1998: Contribution to the macrotectonic subdivision of the border region between the Southern Alps and External Dinarides. Geologija (Ljubljana) 41: 223-255.
- RAKOVEC, I. 1946: Triadni vulkanizem na Slovenskem (*Triassic volcanism in Slovenia*). Geogr. vestnik (Ljubljana) 18: 139-171.
- RAKOVEC, I. 1955: Geološka zgodovina ljubljanskih tal. Zgodovina Ljubljane (Ljubljana) 1: 11-207.
- RAMOVŠ, A. 1953: O stratigrafskih in tektonskih razmerah v borovniški dolini in njeni okolici (*On the stratigraphic and tectonic conditions in the Borovnica Valley and its surroundings*). Geologija (Ljubljana) 1: 90-110.
- RAMOVŠ, A. 1962: Vulkani v rabeljski dobi na Slovenskem. Proteus (Ljubljana) 24/6: 142-143.
- WAAGEN, L. 1907: Die Lamellibranchiaten der Pachycardientuffe der Seiser Alm. Abh. Geol. R.-A. (Wien) 18/ 2: 1-180.
- WILSON, I. 2000: Igneous petrology. Chapman & Hall (London): 1-466.
- WÖHRMANN, S. 1889: Die Fauna der sogenannten Cardita - und Raibler Schichten in den Nord-Tiroler und Gayerischen Alpen. Jb. Geol. R.-A. (Wien) 39/1-2: 181-258.

Volcanic succession of the Borovnik Member (Mohorje Formation), Bloke Plateau area, Central Slovenia

Vulkanske kamnine Borovniškega člena Mohorske formacije na območju Bloške planote

Polona KRALJ & Stevo DOZET

Geological Survey of Slovenia, Dimičeva ul. 14, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
e-mail: p.kralj@geo-zs.si; stevo.dozet@geo-zs.si

Prejeto / Received 3. 11. 2008; Sprejeto / Accepted 12. 11. 2008

Key words: Triassic volcanism, dacitic rocks, peperites, submarine volcanoclastics, Borovnik Member, Mohorje Formation, Central Slovenia

Ključne besede: triasni vulkanizem, dacitne kamnine, peperiti, podmorski vulkanoklastiti, Borovniški člen, Mohorska formacija, osrednja Slovenija

Abstract

A 75 m thick volcanic succession of the Borovnik Member, Mohorje Formation in the Bloke Plateau area consists of dacitic and rhyolitic rocks deposited in a shallow-marine environment. Volcanic activity begun with lava flows that underwent extensive disintegration, autobrecciation and mixing with the underlying unconsolidated fine-grained clastic sediments producing dacite/rhyolite-siltstone peperites. Peperites are very rich in fractured plagioclase phenocrysts, and owing to the incorporation of clastic material, they are commonly depleted in silica. The overlying fining-upward pyroclastic sequence is monotonous. Basal parts mainly consist of coarse-grained vitric tuffs that may contain some smaller pumice lapilli. The overlying volcanoclastics are fine-grained vitric tuffs, and in the uppermost parts of the sequence, they are interbedded with cherts.

The study confirms the existence of primary volcanoclastic succession in the Bloke Plateau area and excludes its epiclastic or reworked origin.

Izvleček

75 m debelo vulkansko zaporedje Borovniškega člena Mohorske formacije na območju Bloške planote sestoji iz dacitnih in riolitnih kamnin, ki so ekstrudirale v plitvo morsko okolje. Vulkanska aktivnost se je pričela z izlivi lave, ki so se zaradi ohlajanja močno drobili, avtobrečirali in mešali z drobnozrnatim sedimentom podlage ter ustvarjali peperite dacita/riodacita in meljevca. Peperiti so bogati z vtrošniki plagioklazov, ki so močno razpokani, zaradi vsebnosti klastičnega nevulkanskega materiala pa so pogosto revnejši s kremenico. Nad peperiti leži zaporedje monotono debelozrnatih in drobnozrnatih tufov z zmanjševanjem zrnivosti navzgor. Spodnji del zaporedja sestoji iz debelozrnatih vitričnih tufov, ki vsebujejo tudi manjše lapile plovca, nad njimi pa leže drobnozrnatih vitrični tufi, ki se proti vrhu menjavajo z roženci.

Naše delo potrjuje izvor primarnega vulkanoklastičnega zaporedja na območju Bloške planote in izključuje njegov epiklastičen oziroma presedimentacijo.

Introduction

The Borovnik Member, assumingly Carnian in age (DOZET 1979, 2002, this volume), forms a part of the Mohorje Formation (Fig. 1) which has been subdivided into four lithostratigraphic members, namely: Bošte Member, Borovnik Member, Rupe Member and Selo at Rob Member (DOZET 1979, 2002, this volume). The Mohorje Formation consists of carbonate, clastic and volcanoclastic rocks, and is underlain conformably by thickly-

bedded and massive, mainly light grey carbonate rocks with numerous dasycladacean.

The Borovnik Member is named according to Borovnik hillock. The best outcroppings occur in a small and deep valley, the Borovnik Ravine. The sequence begins with a small rhyolitic lava flow that underwent mixing with wet unconsolidated silt. Overlying pyroclastics consist of bedded and laminated coarse- and fine-grained rhyolitic tuffs. The magma underwent strong fractionation; plagioclase and alkali feldspar phenocrysts

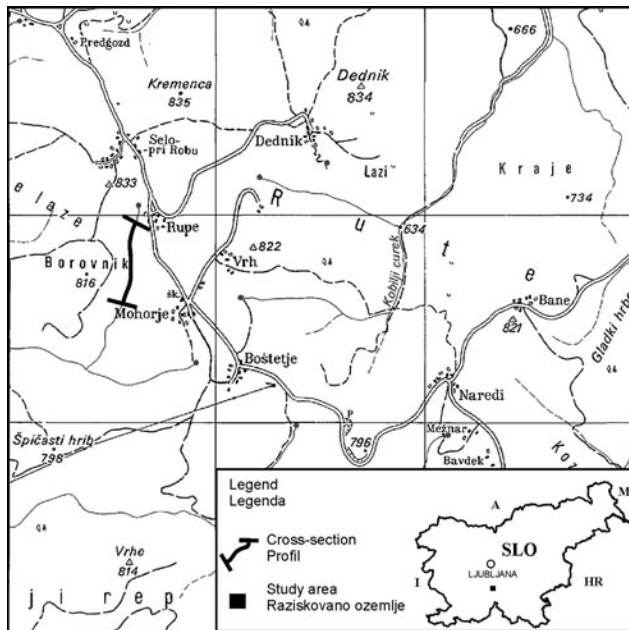


Fig. 1. Location map

were accumulated in the late volcanic products and imparted them a dacitic character. The late-stage dacitic magmas were mainly emplaced as shallow intrusives and underwent mixing with unconsolidated surrounding sediments and tuffs producing dacite/siltstone and dacite/rhyolitic tuff peperites. The peperite composition depends on the quantity of admixed sediment and differs from dacitic composition in the abundance of major oxides and trace elements.

On the territory of Slovenia, the Ladinian epoch was the time of the most intensive volcanic activity during the Mesozoic era (GRAFENAUER, 1980, 1985; GRAFENAUER et al. 1983). For that reason, little attention has been paid to volcanic activity that occurs in Carnian sedimentary successions (DUHOVNIK, 1956; BUSER & HINTERLECHNER-RAVNIK, 1972; DOZET 1979, 2002, this volume). Our study confirms the existence of primary volcanic activity in the Bloke Plateau area and reveals the existence some lithostratigraphic types in the sequence which have not been identified yet.

Petrology of the Borovnik Member

Volcanic sequence (Fig. 2) is underlain by calcarenite composed of slightly recrystallised limestone lithic fragments. Cement is mainly calcite; besides that, up to 7 vol. % of brownish-yellow authigenic paragonite occur. Paragonite was seemingly developed upon thermal-contact metamorphism related to volcanic activity. The calcarenite grades into dacite/siltstone peperite. The peperite is characterised by fluidal texture that resembles laminar structure composed of alternating glassy lava and siltstone. Siltstone is thermally metamorphosed and the primary constituents altered into iron oxides, mixed-layered clay minerals, quartz and albite. Fluidal texture was developed by laminar lava flow that incorporated silt and distributed it along the flow planes. The

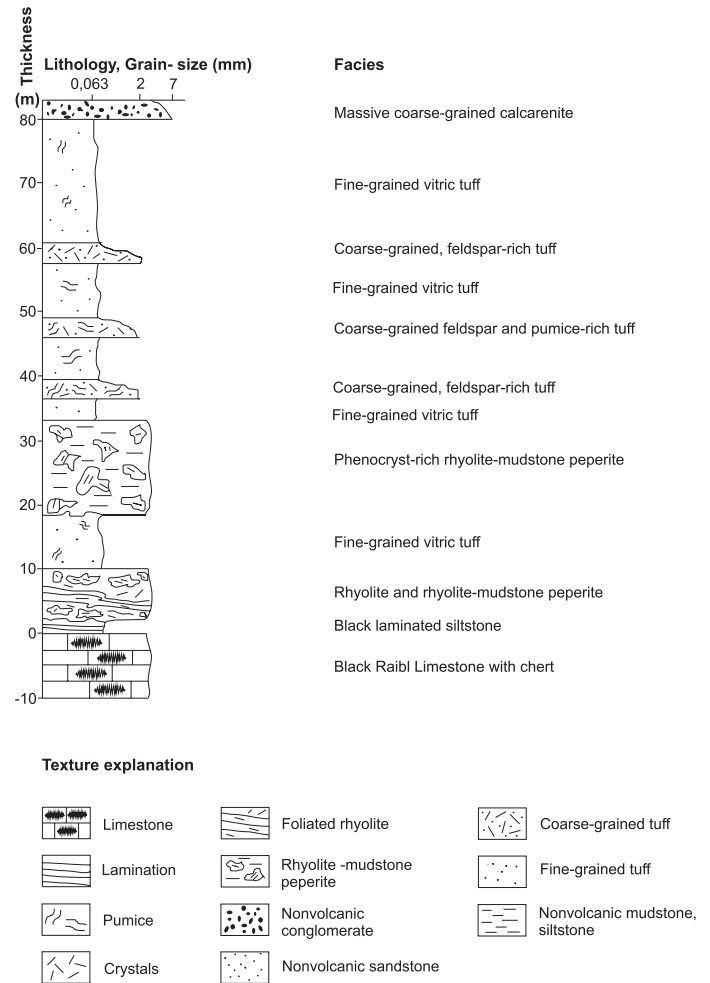


Fig. 2. Cross-section through the Borovnik Member volcanic and volcanoclastic succession

contacts of lava-siltstone laminae are commonly corroded. Authigenic minerals are slightly coarser than in the central parts and are up to 60 μm sized. Up to 100 μm wide veinlets are composed of fine-grained quartz.

The overlying pyroclastic sequence consists of bedded to laminated rhyolitic vitric tuffs ranging in grain-size from coarse- to fine-grained. In general, the trend of upward fining can be recognised. Lamination and bedding may be locally only faintly or vaguely. The tuff consists of rhyolite glass shards; coarser varieties may contain subordinate amounts of pumice. Plagioclase crystals are rare, too, and amount up to 10 vol. % of the bulk rock. Volcanic glass is extensively altered into microcrystalline quartz and albite, and filosilicates – mixed layered clay minerals and chlorite. Pyroclastic sequence terminates with fine-grained conglomerate. The grains are well-rounded to subangular and composed of quartzite. Cement consists of calcite and limonite. Pyroclastic sequence is intruded by dacite contaminated by siltstone. Dacite/siltstone peperite and dacite/rhyolitic tuff peperite developed. All rock varieties are extremely rich in plagioclase and potassium feldspar phenocrysts and indicate that they evolved from accumulates formed by crystal fractionation during magma development.

Dacite consists of phenocrysts of zonal, or more rarely, twinned plagioclases attaining the size up to 3 mm. They are replaced by fine-grained cloudy aggregates of albite which is slightly kaolinized and sericitized. Potassium feldspars mainly belong to sanidine and they are relatively well preserved. Glassy groundmass is entirely altered into secondary minerals, mainly chlorite, iron oxides, quartz, albite, epidote, prehnite, and in some places calcite.

Peperite composition is also dominated by plagioclase and potassium feldspar phenocrysts, which have the same size and composition as in dacite. They are commonly corroded and characteristically cut by microfracture systems resulting from stress during magma intrusion into sediment and their mixing. The microfracture systems in phenocrysts are commonly filled by authigenic feldspar of the same composition as the phenocryst, or by quartz or iron oxides. Glassy groundmass and siltstone are mixed and extensively altered, mainly into iron oxides, chlorite, paragonite and quartz. In dacite/rhyolitic tuff peperite epidote, prehnite, quartz and albite also occur, but iron oxides are less extensively developed. Zircon grains partially originate from the zircons magma and partially from the siltstone. Zircons have broad reaction rims originating from radioactive decay, and show roundness, that could have been developed in several reworking cycles. Apatite originates from the magma, or partially from authigenic growth as a consequence of thermal metamorphism.

Geochemistry of the Borovnik Member

Sixteen representative fresh rock samples were chosen for chemical analysis, which was performed at X-RAL Activation Services Inc., Don Mills, Ontario, by combined wet chemical method, ICP (Inductively Coupled Plasma Source), XRF (X-Ray Fluorescence), and MS (Mass Spectroscopy) to attain high analytical precision and reproducibility. The content of major and trace elements is shown in Tables 1, 2, and 3.

Table 1. Major oxides (in wt. %)

Oxide/ Sample	No.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	TOT/C	TOT/S	Sum
GGS-10	4	64,53	0,08	18,62	2,76	0,72	3,19	0,04	4,65	1,64	0,08	0,26	1,25	99,81
GGS-11	5	63,69	0,07	18,15	4,45	1,07	3,36	0,06	4,55	1,03	0,07	0,16	1,31	99,8
GGS-12	6	78,07	0,03	12,15	1,42	0,51	0,2	0,01	6,03	0,25	0,03	0,06	0,03	99,76
GGS-13	7	66,31	0,07	18,21	2,48	0,91	3,04	0,03	4,06	1,64	0,07	0,08	0,84	99,75
GGS-14	8	64,59	0,07	18,65	2,28	0,8	4,25	0,03	4,95	1,22	0,07	0,38	0,67	99,78
GGS-15	9	72,98	0,04	13,76	1,97	0,99	1,9	0,01	3,09	1,96	0,04	0,18	0,02	99,79
GGS-16	10	79,2	0,02	11,81	1,14	0,58	0,08	<0,01	5,27	0,5	0,02	0,04	0,01	99,89
GGS-17	11	75,69	0,02	13,1	1,88	0,8	0,67	0,01	4,83	1,01	0,02	0,04	0,01	99,85
GGS-19	12	74,06	0,03	14,34	1,52	0,71	0,23	0,01	5,36	1,42	0,03	0,04	0,01	100,01
GGS-21	13	75,76	0,02	13,6	1,37	0,7	0,19	0,01	4,96	1,28	0,02	0,04	0,01	99,88
GGS-22	15	70,1	0,03	15,09	2,97	1,39	1,48	0,01	2,22	2,82	0,03	0,07	<0,01	99,83
GGS-23	16	76,7	0,02	12,83	1,59	0,8	0,12	0,01	5,38	0,74	0,02	0,03	<0,01	99,88
GGS-24	17	76,43	0,02	13,49	0,95	0,65	0,19	0,01	4,8	1,35	0,02	0,07	<0,01	99,88
GGS-28	18	75,89	0,02	13,34	1,24	0,75	0,51	0,01	5,23	0,9	0,02	0,12	<0,01	99,89
GGS-29	19	78,27	0,02	12,15	1,06	0,49	0,43	0,01	5,43	0,65	0,02	0,11	0,01	99,9
GGS-30A	20	77,59	0,02	12,78	0,84	0,48	0,33	0,01	5,29	0,87	0,02	0,08	<0,01	99,9

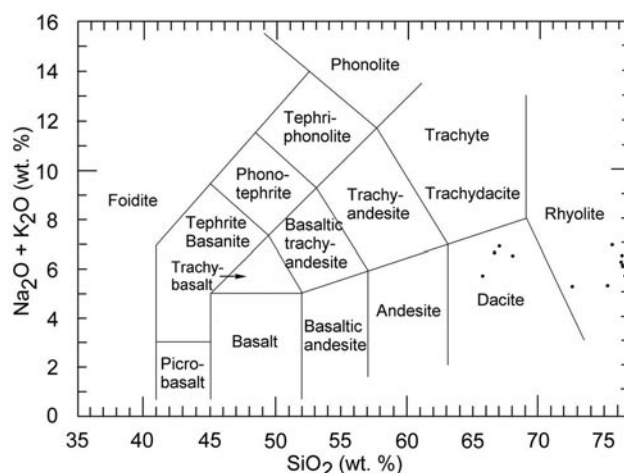


Fig. 3. Classification of the Borovnik Member volcanics in the alkali-silica diagram after LE BAS et al. 1986

The rocks have variable silica content ranging from 65,7 wt. % to 80,2 wt. % (recalculated on water-free basis). FeO_{tot} varies from 0,94 wt. % to 5,05 wt. %, and MgO from 0,48 wt. % to 1,39 wt. %; both oxides are appreciably enriched in contaminated dacite and dacite/siltstone peperite. Similarly broad variation and enrichment have been observed for alkali and alkaline earth metal oxides – CaO (0,12–4,25 wt. %), Na₂O (3,09–6,03 wt. %) and K₂O (0,65–2,82). In the TAS classification diagram (LE BAS et al. 1986), the samples are clustered into two groups occupying the dacite and rhyolite fields (Fig. 3). The majority of pyroclastic rocks shows rhyolitic affinity. The dacite composition of some samples arises from two main processes – fractional crystallization that caused accumulation of plagioclases and accessory minerals like zircon and apatite, and magma contamination with the sediment during the peperite formation.

Trace element abundance and some elemental ratios are displayed in Tables 2, 3 and 4. Incompatible trace elements range from 108,1–1118,2 ppm for Ba, 38,1–343,9 ppm for Sr and 14,9–176,6 ppm for Rb. Among compatible trace

Table 2. Trace elements (in ppm)

Element/ Sample	No.	Ni	Sc	Ba	Be	Co	Cs	Ga	Hf	Nb	Rb	Sn	Sr	Ta
GGs-10	4	20	13	536,4	2	8,6	3,2	21,5	5,9	11,1	55,3	3	272,6	0,8
GGs-11	5	22	13	450,9	2	14,1	2,3	21,3	5,8	11,3	31,9	2	302,9	0,7
GGs-12	6	11	5	1198,2	1	19,3	0,5	13,1	4,9	11,5	14,9	7	57,6	1,3
GGs-13	7	11	13	761,1	3	10,5	5,2	21,4	6,4	13,1	70,6	3	311,6	0,9
GGs-14	8	12	15	683,4	3	8,8	2,6	21,2	7,3	14,3	43,8	2	343,9	0,8
GGs-15	9	16	8	639,2	3	6,9	6,1	16,5	5,3	12,3	116,5	6	211,5	1,0
GGs-16	10	9	4	122,8	2	17,5	0,9	13,6	4,6	10,6	33,8	6	38,3	1,3
GGs-17	11	10	6	324,8	2	10,4	2,6	14,9	5,4	12,0	56,4	6	118,2	1,2
GGs-19	12	6	6	284,3	4	7,3	3,2	18,9	5,9	13,3	85,0	8	57,5	1,3
GGs-21	13	12	5	269,6	4	14,4	3,1	16,5	5,0	12,0	81,6	7	60,5	1,3
GGs-22	15	<5	10	480,2	4	4,5	8,5	20,1	6,2	13,5	176,6	6	136,2	1,1
GGs-23	16	6	5	169,7	3	15,2	1,4	16,6	5,0	11,9	47,1	7	53,6	1,3
GGs-24	17	6	5	198,1	3	9,5	2,2	19,3	5,1	12,3	85,0	8	45,3	1,3
GGs-28	18	7	5	160,7	4	11,5	1,7	16,4	4,7	12,2	50,1	7	39,8	1,2
GGs-29	19	5	4	108,1	2	10,6	1,2	12,8	4,3	10,9	37,3	6	39,1	1,1
GGs-30A	20	<5	5	133,0	3	21,3	1,4	15,2	4,6	11,6	49,3	7	38,1	1,2

Table 2. – Continuation

Element/ Sample	No.	Th	U	W	Zr	Mo	Cu	Pb	Zn	Ni	As	Hg
GGs-10	4	17,6	3,1	134,6	221,9	0,7	2,6	22,6	24	0,8	13,3	0,02
GGs-11	5	16,1	2,4	171,3	229,3	0,7	2,4	24,0	30	0,8	13,0	0,06
GGs-12	6	23,7	9,7	252,2	130,2	0,1	1,5	59,4	51	0,6	2,,2	0,05
GGs-13	7	19,9	3,4	159,6	240,6	0,3	2,3	21,0	21	0,8	10,6	0,05
GGs-14	8	18,7	5,2	149,8	285	0,4	2,5	20,2	33	0,7	10,4	0,05
GGs-15	9	23,3	5,1	103,4	171,1	0,1	1,5	42,4	32	0,1	<0,5	0,02
GGs-16	10	22,1	9,2	339,2	115,7	0,1	4,8	6,7	28	0,4	2,5	0,03
GGs-17	11	21,2	6,3	215,4	158,8	0,2	3,1	21,8	42	0,3	1,5	0,06
GGs-19	12	27,3	7,5	136,5	159,0	0,1	1,8	2,2	36	0,2	2,5	0,04
GGs-21	13	25,6	8,5	196,2	132,7	0,1	1,7	4,0	36	0,3	1,8	0,06
GGs-22	15	23,5	4,5	63,0	199,9	<0,1	1,0	3,7	38	0,2	1,6	0,01
GGs-23	16	24,4	6,0	220,1	132,0	0,1	1,3	50,0	50	0,3	2,0	0,06
GGs-24	17	25,2	5,4	181,2	130,9	0,1	2,3	4,1	19	0,4	2,0	0,05
GGs-28	18	24,1	7,1	157,1	124,0	0,1	8,1	9,4	40	1,2	4,1	0,05
GGs-29	19	23,7	7,2	173,6	114,7	0,1	4,3	4,5	27	0,9	2,8	0,05
GGs-30A	20	22,7	6,1	259,1	121,4	0,1	2,4	4,3	23	0,6	2,7	0,05

Table 3. REE elements (in ppm)

Element/ Sample	No.	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
GGs-10	4	22,9	81,8	170	17,66	61,9	8,89	2,08	5,40	0,87	4,03	0,74	2,10	0,32	2,06	0,31
GGs-11	5	26,0	51,0	110,1	11,46	41,1	6,16	2,09	4,64	0,84	4,30	0,88	2,48	0,38	2,53	0,39
GGs-12	6	36,9	36,3	85,3	9,81	36,7	7,43	0,67	5,94	1,17	5,99	1,17	3,46	0,54	3,63	0,54
GGs-13	7	23,4	87,0	181,6	19,08	68,0	9,79	2,20	6,15	1,00	4,62	0,79	2,17	0,31	2,19	0,32
GGs-14	8	34,3	92,6	191,0	20,24	72,1	10,53	2,53	7,28	1,23	5,94	1,10	3,09	0,47	3,10	0,48
GGs-15	9	37,7	58,5	127,8	14,29	51,0	9,02	1,23	6,78	1,27	6,27	1,15	3,21	0,47	3,22	0,46
GGs-16	10	35,4	32,2	75,9	8,90	32,4	6,70	0,68	5,41	1,05	5,61	1,09	3,13	0,49	3,27	0,49
GGs-17	11	37,5	46,0	100,9	11,62	42,2	7,91	0,94	6,29	1,22	6,22	1,20	3,38	0,53	3,45	0,51
GGs-19	12	42,4	40,3	91,6	10,78	40,9	8,09	0,65	6,56	1,31	6,94	1,31	3,97	0,61	4,19	0,62
GGs-21	13	38,9	37,7	83,8	10,12	38,5	7,60	0,59	6,05	1,21	6,22	1,23	3,68	0,59	3,98	0,60
GGs-22	15	38,7	66,1	137,9	15,64	56,2	9,90	1,29	7,53	1,38	7,00	1,23	3,25	0,48	3,12	0,46
GGs-23	16	38,6	38,1	85,4	9,94	37,6	7,51	0,59	6,21	1,28	6,56	1,25	3,63	0,55	3,74	0,56
GGs-24	17	38,1	30,5	70,6	8,20	29,5	6,24	0,50	5,11	1,15	6,24	1,25	3,72	0,59	3,99	0,60
GGs-28	18	58,9	49,5	89,7	13,22	52,2	11,41	0,94	10,22	1,99	9,51	1,84	5,12	0,75	5,03	0,76
GGs-29	19	43,6	37,4	78,1	10,00	38,7	7,84	0,65	6,99	1,37	6,80	1,32	3,84	0,61	3,99	0,59
GGs-30A	20	37,9	37,3	75,1	9,75	36,4	7,52	0,67	6,11	1,24	6,43	1,21	3,51	0,55	3,67	0,52

Table 4. Some elemental ratios

Oxide/ Sample	No.	La _{PAAS} /Yb _{PAAS}	La _{PAAS} /Sm _{PAAS}	Gd _{PAAS} /Yb _{PAAS}	Eu/Eu _{Ch} *	Th/U	Zr/Nb	La _{Ch} /Yb _{Ch}	La _{Ch} /Sm _{Ch}	Gd _{Ch} /Yb _{Ch}
GGS-10	4	2,93	1,34	1,59	0,92	5,68	20,01	26,83	6,46	2,12
GGS-11	5	1,49	1,20	1,11	1,07	6,71	20,29	13,62	5,21	1,49
GGS-12	6	0,74	0,71	0,99	0,55	2,44	11,32	6,83	3,08	1,38
GGS-13	7	2,93	1,29	1,70	0,90	5,85	18,37	26,83	5,59	2,28
GGS-14	8	2,21	1,28	1,42	0,92	3,60	19,93	20,19	5,54	1,90
GGS-15	9	1,34	0,94	1,27	0,68	4,57	13,91	12,28	4,08	1,71
GGS-16	10	0,73	0,70	1,00	0,58	2,40	10,92	6,67	3,03	1,34
GGS-17	11	0,98	0,84	1,10	0,63	3,37	13,23	9,01	11,60	1,48
GGS-19	12	0,71	0,72	0,95	0,51	3,64	11,95	6,50	3,14	1,27
GGS-21	13	0,70	0,72	0,92	0,51	3,01	11,04	6,40	3,12	1,23
GGS-22	15	1,56	0,97	1,46	0,66	5,22	14,81	14,32	3,10	1,21
GGS-23	16	0,75	0,74	1,00	0,51	4,07	11,09	6,88	3,19	1,35
GGS-24	17	0,56	0,71	0,78	0,51	4,67	10,64	5,17	3,08	1,04
GGS-28	18	0,73	0,63	1,23	0,51	3,39	10,16	6,65	2,72	1,65
GGS-29	19	0,69	0,69	1,06	0,51	3,29	10,52	6,33	3,00	1,42
GGS-30A	20	0,75	0,72	1,01	0,54	3,72	10,47	6,87	3,12	1,35

PAAS normalization – Post Archean Australian Shale (TAYLOR & McLENNAN, 1985; Ch normalization - chondritic values after NAKAMURA, 1974)

elements, Ni displays a trend of decrease with the increasing silica content from maximum 22 ppm in dacite to <5 ppm in rhyolite. Sc varies from 4 ppm to 15 ppm, and shows similar decreasing trend with increasing SiO₂ (Fig. 4). V ranges from 20 ppm in dacites and dacite/siltstone peperites to <5 ppm in rhyolites. The content of TiO₂ ranges from 0,08 wt.% in rhyolites to 0,27 wt. % in dacites and dacite/siltstone peperites, and this trend is identical to that for Sc (Fig. 4). There is a similar, but unexpected trend of decreasing Zr abundance with increasing silica (Fig. 4) – from 114,7 ppm in rhyolite to 285 ppm in dacite. In dacite and dacite/siltstone peperite, zircon grains are well seen. Some of them seem to have igneous origin, but the others have broad dark margins and rounded form, originated very possibly from sedimentary rocks, maybe from several reworking cycles even. Nb variations are scattered and range from 10,6 ppm to 14,3 ppm. The shows a consistent trend of increase with increasing silica (Fig. 4); for U the trend is about the same but the values are more scattered than for Th, what can be seen from the diagram Zr/Nb vs Th/U (Fig. 4).

Chondrite (Ch) normalized abundance (after NAKAMURA, 1974) of the analysed samples is about 100 times higher for LREEs, and about 10 times higher for HREEs than chondritic values. Rare earth elements (REEs) show fractionation and contamination processes. Fractionation of plagioclases is reflected in more extreme negative europium anomalies (Eu/Eu*) for rhyolitic rocks (0,51–0,58) than for dacitic rocks (0,68–0,92). Contamination with the sediment is best shown in the opposite trends of LREEs and HREEs with chondrite normalized samples. The sediment is enriched with LREEs which is the cause for unusual virtual decrease of LREEs with increased silica (Fig. 4). That is also reflected in the La_{PAAS}/Yb_{PAAS} (PAAS – Post Archean Australian Shale, after TAYLOR & McLENNAN, 1985) and

La_{Ch}/Yb_{Ch} (Ch – chondrite, after NAKAMURA, 1974) ratios (Table 4) which are relatively consistent for rhyolitic pyroclastic rocks (0,49–0,73), but variable for contaminated dacites and dacite/siltstone peperites (1,34 – 2,93). Similar relation can be observed for the La_{PAAS}/Sm_{PAAS} and La_{Ch}/Sm_{Ch} ratios ranging from 0,63–0,74 for rhyolites and from 0,94–1,29 for dacitic rocks. Yttrium, as expected, follows the trend of HREEs and increases with the increase in silica (Fig. 4).

Conclusions

About 230 metres thick Julian and Tuvalian (Middle and Upper Carnian) Mohorje Formation in the Bloke Plateau area comprises a 75 m thick Borovnik Member composed of volcanic and volcanoclastic rocks deposited in a shallow-marine environment. Volcanic activity started with an extrusion of a minor rhyolitic lava flow that underwent mixing with the enclosing silty sediment. Rhyolite/dacite peperite with flow structure developed. The lava extrusion was followed by a vigorous explosive volcanic activity that produced coarse- and fine-grained vitric tuffs of rhyolitic composition. The tuffs are bedded and laminated and form a fining-upward sequence. Coarser-grained tuffs commonly contain some pumice lapilli.

Magmas producing the pyroclastic sequence were strongly fractionated, and a great part of plagioclase and alkali feldspar phenocrysts had been removed from the melt in the time of extrusion. The magma with accumulated phenocrysts erupted the latest, and was emplaced into wet unconsolidated sediments and tuffs as a shallow or subsurface body. The dacite composition is related to the phenocryst separation from rhyolitic or rhyodacitic magma. The “dacite” composition is also observed for the peperite samples, but in a

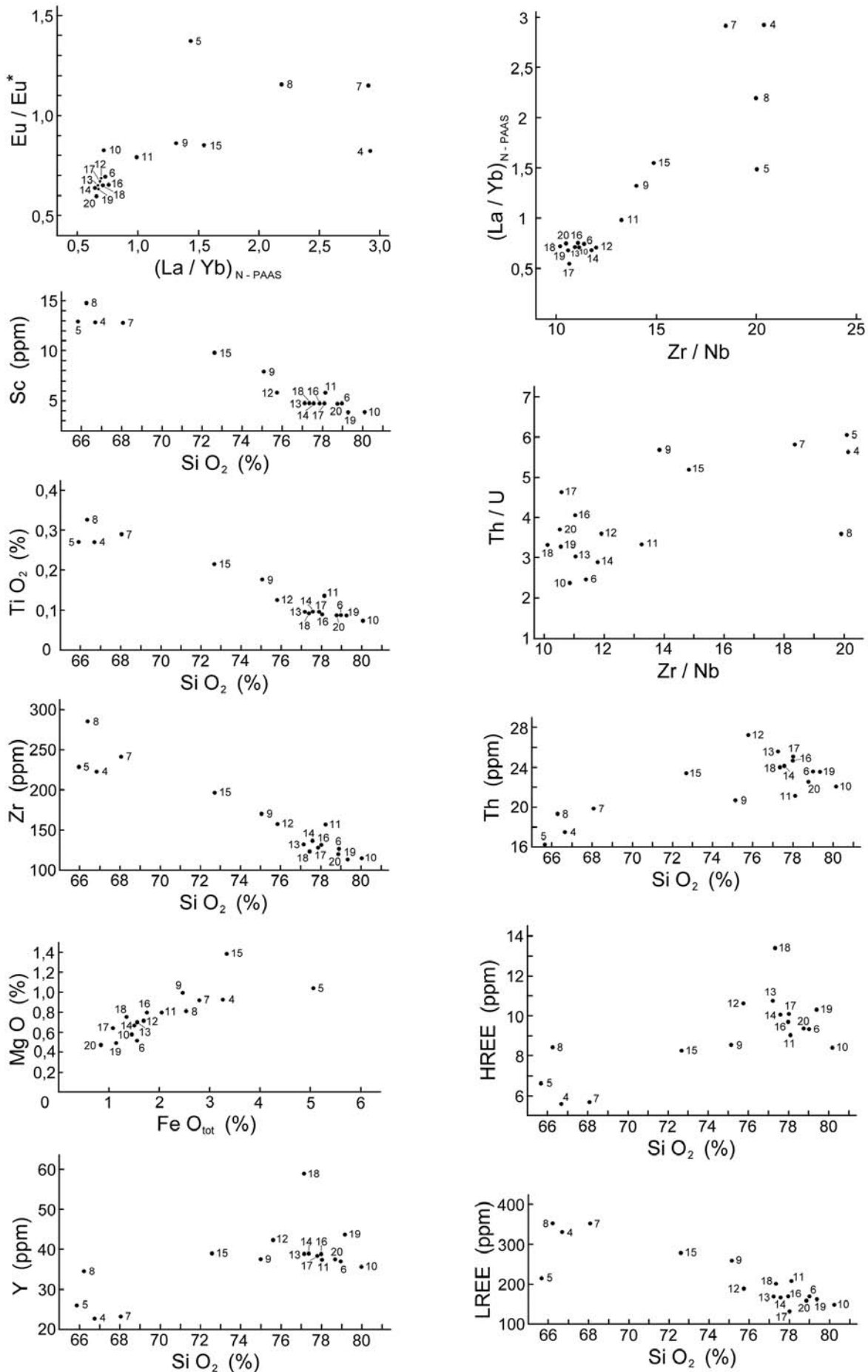


Fig. 4. Some elemental (oxide) ratios for the Borovnik Member Volcanics (N-PAAS, normalization to PAAS values, Eu/Eu* europium anomaly based on chondritic values of NAKAMURA, 1974, and calculated after proposal of TAYLOR & McLENNAN, 1985).

more extreme way owing to more siltstone component admixed. External water originating from the enclosing sediments and/or tuffs and the heat from shallow intrusive body developed ephemeral hydrothermal conditions reflected in extensive alteration of the groundmass, tuff and siltstone peperite matrix. The most abundant authigenic minerals are iron oxides, filosilicates, quartz and albite, although epidote and prehnite also occur particularly in the dacite/rhyolitic tuff peperite.

Acknowledgements

Our work was granted by Slovenian Research Agency, Programmes P1-0011 and P1-0025. We are kindly acknowledged to Dr. Bogomir Celarc for reviewing the manuscript.

References

- BUSER, S. & HINTERLECHNER-RAVNIK, A. 1972: Sledovi karnijskega vulkanizma v južni Sloveniji. 7. Geol. Kongr. Savez. geol. društ. Jugosl. (Zagreb) 1: 113–119.
- DOZET, S. 1979: Karnijske plasti južno in zahodno od Ljubljanskega barja (*Carnian beds south and west of the Ljubljana Moor*). Geologija (Ljubljana) 22/1: 55–70.
- DOZET, S. 2002: Grosupeljsko-Oreleške paralično-plitvovodne plasti (*Grosuplje-Orle paralic-shallow water beds*). RMZ, Mater. & Geovir. (Ljubljana) 49/4: 571–591.
- DOZET, S. 2009: Mohorje Formation, Southern Slovenia. Geologija (Ljubljana), 52/1: this volume.
- DUHOVNIK, J. 1956: Pregled magmatskih in metamorfnih kamenin Slovenije (*Review of igneous and metamorphic rocks in Slovenia*). Prvi jugosl. geol. kongr. (Ljubljana) 1: 23–26.
- GRAFENAUER, S. 1980: Petrologija triadnih magmatskih kamnin na Slovenskem (*Petrology of Triassic igneous rocks in Slovenia*). Razprave 4. razr. SAZU (Ljubljana) 25: 1–220.
- GRAFENAUER, S. 1985: Nastanek triasnih magmatskih kamnin na Slovenskem (*Origin of Triassic igneous rocks in Slovenia*). Razprave 4. razr. SAZU (Ljubljana) 26: 387–400.
- GRAFENAUER, S., DUHOVNIK, J. & STRMOLE, D. 1981: Magmatske kamnine v zahodnih Karavankah (*Igneous rocks in Western Slovenia*). Rud. met. zbornik (Ljubljana) 28/2–3: 127–150.
- GRAFENAUER, S., DUHOVNIK, J. & STRMOLE, D. 1983: Triadne magmatske kamnine vzhodne Slovenije (*Triassic igneous rocks of Eastern Slovenia*). Geologija (Ljubljana) 26: 189–241.
- LE BAS, M.J., LEMAITRE, R. W., STRECKEISEN, A. & ZANETTIN, B. 1986: A chemical classification of volcanic rocks based on total alkali-silica diagram. *J. Petrology* (Oxford) 27: 745–750.
- NAKAMURA, N. 1974: Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta* (Amsterdam) 38: 757–775.
- TAYLOR, S. R. & McLENNAN, S. M. 1985: The continental crust: Its composition and evolution. Blackwell Scientific Publications, 1–186.

Pseudopolyconites slovenicus n.sp. resedimented to Paleocene flysch breccia of the Soča river valley (Slovenia)

Pseudopolyconites slovenicus n.sp. presedimentiran v paleocensko flišno brečo Posočja

Mario PLENIČAR¹ & Bogdan JURKOVŠEK²

¹Oddelek za geologijo, Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani, Privoz 11, SI-1000 Ljubljana, Slovenija

²Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ul. 14, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
e-mail: bogdan.jurkovsek@geo-zs.si

Prejeto / Received 29. 1. 2009; Sprejeto / Accepted 5. 3. 2009

Key words: redeposited rudist, *Pseudopolyconites*, taxonomy, Soča Valley, Slovenia

Ključne besede: presedimentiran rudist, *Pseudopolyconites*, taksonomija, Posočje, Slovenija

Abstract

An entirely preserved large specimen of Upper Cretaceous rudist *Pseudopolyconites slovenicus* n. sp. is described, characterized by the low and broad lower valve surrounded by a thick envelope of tiny straight tubules. The specimen was redeposited in Paleocene from the northern edge of Adriatic-Dinaric carbonate platform into a marginal part of the flysch basin.

Izvleček

Opisan je v celoti ohranjen velik primerek zgornjekrednega rudista *Pseudopolyconites slovenicus* n. sp. za katerega je značilna nizka in široka spodnja lupina obdana z debelim ovojem drobnih ravnih cev. Primerek je bil v paleocenu presedimentiran s severnega roba Jadransko-dinarske karbonatne platforme v obrobni del flišnega bazena.

Introduction

At the Bitež settlement 2 km north of Grgar and 6 km southeast of Anhovo (Fig. 1) the owner of property Ivan Štrukelj found a large specimen of Upper Cretaceous rudist of the *Polyconites* genus in the excavation for a farm building in Paleocene flysch breccia. The specimen is preserved in the Gorica Museum at Nova Gorica (Stanislav Bačar's museum exhibition of fossils at Ajdovščina, arch. no. 8142).

Finds of resedimented rudists in Paleocene flysch of the Soča river valley have been described already at the beginning of 20th century. Numerous fossils were found, and registered in their writings already by KOSSMAT (1906, 1908, 1909, 1913, 1920) and WINKLER (1920, 1923), but only WIONTZEK (1934) more precisely determined and described the collected fossil material, to which he added also his own rudist collection. BUSER (1986, 1987) who mapped in the frame of the Basic geologic map of SFR Yugoslavia the sheet Tolmin and Videm (Udine), found in flysch beds of the Soča valley numerous new localities of resedimented rudists (BUSER et al., 1988). D. PEJOVIĆ (1996) among

collected rudists of Podbrdo flysch cyclotheme determined the species *Vaccinites giordanii* (Pirone), *Hippuritella cornucopiae* (Defrance) and the new species *Pironaea buseri* Pejović.

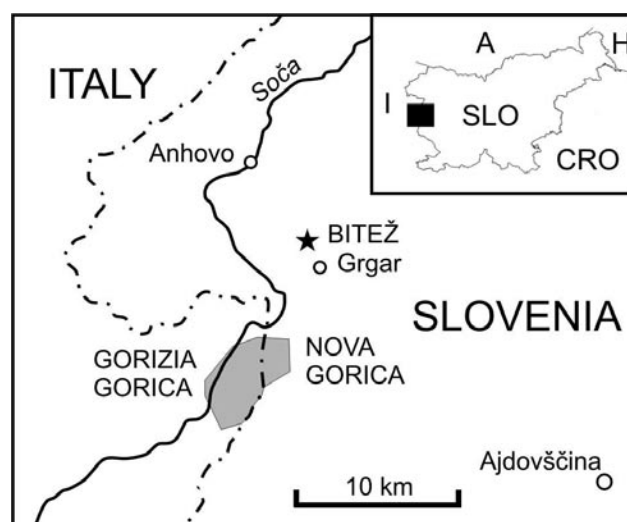


Fig. 1. Location map of *Pseudopolyconites slovenicus* n. sp.

Collecting of rudists in Paleocene flysch beds in surroundings of Anhovo was carried out between 1999 and 2000 by Jurkovšek who assembled a large collection of redeposited rudist fauna in which the following species have been determined (PLENIČAR, 2005; PLENIČAR et al., 2001): *Vaccinites vesiculosus* (Woodward), *Hippuritella lapeirousei* (Goldfuss), *H. ex gr. castroi* sensu Vicens, *H. heritschi* (Kühn), *Hippurites bioculatus* (Lamarck), *H. conicus adriaticus* Sladić-Trifunović, *H. turgidus* Roland du Coquan, *H. colliciatatus* Woodward, *Bournonia* cf. *excavata* (D'Orbigny) Douvillé, *Sabinia aniensis* Parona and *Offneria* cf. *italica* Masse. All described fossils were redeposited in Paleocene to the flysch environment. For certain species on the basis of comparison with species found in primary Cretaceous platform carbonate rocks the exact location of their primary source and stratigraphic position could be established, while for some of them (e.g. the genus *Pironaea*) we presume that they lived at the edge of the carbonate platform which became later in totality eroded.

Geologic description

Upper Cretaceous and Paleocene beds with re-sedimented rudists are developed in Slovenia in the region of External Dinarides only. The flysch basin was shifted already end of Cretaceous from the area of Slovenian basin to the region of Adriatic-Dinaric carbonate platform. Flysch between Grgar and Anhovo belongs predominantly to the marginal respectively proximal part of the flysch basin, therefore it consists numerous intercalations of calcareous and conglomeratic breccia as a result of submarine slumps (SKABERNE, 2003; POGAČNIK et al., in press). They are up to several tens of meters thick, and they locally predominate over interbedding of marlstone, sandstone and calcarenite. KUŠČER with co-workers (1976) reported limestone blocks up to 100 m long and 30 m thick. To very large calcareous olistoliths belong probably also the Cretaceous limestone southeast of Anhovo that was marked as smaller tectonically delimited blocks within the Paleocene flysch on the Basic geologic map, sheet Tolmin and Videm by BUSER (1987).

The Paleocene flysch between Anhovo and Grgar contains next to well preserved rudists and fragments of rudist limestone also pieces of various Triassic and Jurassic limestones. Nummulites and alveolinas, otherwise frequent fossils in younger flysch levels of this area have not been recorded so far either in cement or among breccia fragments. The Lower to Upper Paleocene age of flysch was determined only locally by nannoplankton which, however, does not exclude the possibility of Eocene beds in the upper part of flysch sedimentation.

At Bitež lies the breccia with grey, grey green and brown violet marly cement just above the erosional boundary with the Upper Cretaceous limestone from which rudists of genera *Durania*, *Gorjanovicia*, *Rajka*, *Sauvagesia* and *Lapeirouseia* have been mentioned by BUSER (1986). In this area

is characteristic for the Upper Cretaceous platform development also the horizon with rounded rudist valves that belong mostly to genus *Sabinia*.

In addition to the new species *P. slovenicus* in the Paleocene breccia above the earlier described Santonian-Campanian limestone also several other resedimented rudists were collected. They will be the object of future research together with regional geologic investigations and examination of nannoplankton in marly cement.

Systematic paleontology

Familia: PSEUDOPOLYCONITIDAE
Sladić-Trifunović, 1980

Genus: *Pseudopolyconites* Milovanović, 1935
Pseudopolyconites slovenicus n.sp.

Fig. 2 a – c

Derivation of name: after state of Slovenia where the specimen was found.

Holotype: a complete valve (Fig. 2 a – c, sample no 8142, Gorica Museum: Museal exposition of Stanislav Bačar's fossils at Ajdovščina).

Type locality and stratigraphic position: Bitež settlement near Grgar, Soča river valley; resedimented into Paleocene flysch breccia.

Material studied: A single specimen with both valves (Holotype).

Diagnosis: Low and broad (dish-shaped) lower valve and convex upper valve. Lower valve is covered with an envelope of straight tubules which are visible on the external surface as tiny parallel furrows. The lower valve has a slightly concave anterior part and a convex posterior, or cardinal side. The pseudocolumns E and S are poorly expressed.

Description

The entire specimen of rudist (the lower and upper valves) is slightly eroded on surface. The relatively low and broad lower valve together with the convex upper valve measures in height 14 cm and in diameter 21 cm at the commissural part at contact of the two valves. The lower valve is of shallow conical (dishlike) shape, and the upper valve represents its convex cover. The lower valve is covered with an envelope of »growth tubules«. Tubules are straight, and appear on the external side of valve as fine parallel furrows. The »growth tubules« are not observed on upper valve.

A horizontal section across the upper valve has been made at a distance of 4 cm below the commissure. In the section, internal structure of lower valve consisting of several layers is visible. On its external side it is surrounded by the envelope of straight »growth tubules« of about 1 mm diameter. The tubular envelope is 10 to 20 mm wide. The envelope of »growth tubules« is followed by a cortical layer whose structure is not clear (it is probably a lamellar layer). Thickness of this layer varies largely, from 3 mm on the side of ligamen-

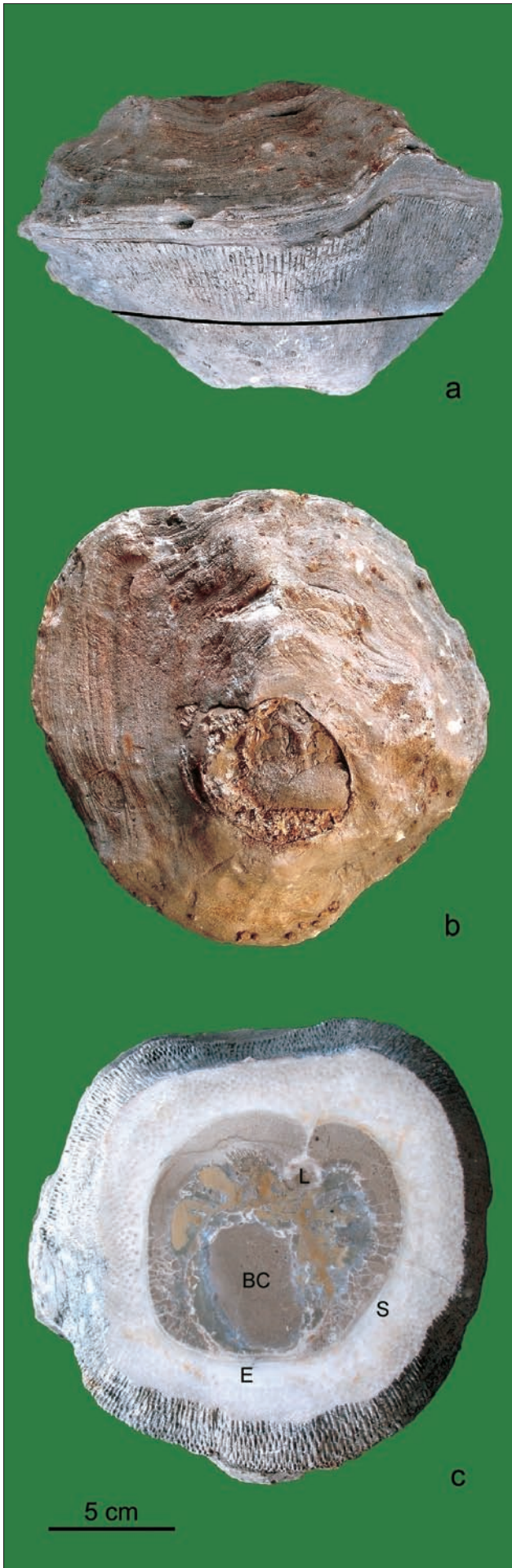


Fig. 2 a. *Pseudopolyconites slovenicus* n.sp. – upper and lower valve; holotype; Gorica Museum: Museal exposition of Stanislav Bačar's fossils at Ajdovščina, sample no. 8142, Bitež near Grgar. Sl. 2 a. *Pseudopolyconites slovenicus* n.sp. – zgornja in spodnja loputa; holotip; Goriški muzej: Muzejska razstava fosilov Stanislava Bačarja v Ajdovščini, vzorec št. 8142, Bitež pri Grgarju.

Fig. 2 b. *P. slovenicus* n.sp.; holotype; – upper valve
Sl. 2 b. *P. slovenicus* n.sp.; holotip; – zgornja loputa

Fig. 2 c. *P. slovenicus* n.sp. – cross section through the lower valve, 4 cm below the commissure
L = ligamental column; S, E = siphonal pseudocolumns;
BC = main body cavity

Sl. 2 c. *P. slovenicus* n.sp. – prečni presek spodnje lupine, 4 cm pod komisuro
L = ligamentni stebriček; S, E = sifonalna psevdostebrička;
BC = glavna bivalna votlina

tal column to around 10 mm in the siphonal zone. This layer is separated from the internal part of valve by a rather uniformly thick intermediate layer that is recrystallized, and from it protrudes the ligamental column L. On the internal side of the lower valve follows an irregularly thick darker laminar layer that laterally passes into variously thick, irregularly shaped prisms of the prismatic layer.

The lower valve has a flat to slightly concave anterior side and a convex posterior, or cardinal side. The siphonal pseudocolumns E and S are poorly expressed.

Very important in genus *Pseudopolyconites* is the shape of the ligamental column in various horizontal sections of the lower valve that display various stages of ontogenetic evolution of the same individual. In the described specimen of *P. slovenicus*, in the section of lower valve that corresponds to later ontogenetic stages, is the head of ligamental column large and of pentagonal outline with a diameter of up to 13 mm. The stem at ligamental column is relatively thin, and measures in the horizontal section of valve (4 cm below the commissure) 8 mm in length.

Position of both teeth is not clear. Probably the teeth are oriented at a small angle to axis of the ligamental column.

Remarks

Species *P. slovenicus* is to the most similar to species *P. serbicus* Milovanović (MILOVANOVIĆ, 1939; PEJOVIĆ & SLADIĆ-TRIFUNOVIĆ, 1977) and *P. dechaseauxae* Milovanović & Sladić (MILOVANOVIĆ & SLADIĆ, 1957). The first one has a large, oblong head of ligamental column in the late ontogenetic stage, and the shape of a thin hook in the early ontogenetic stage. The stem of ligamental column in species *P. serbicus* is thicker as in species *P. slovenicus*. The section of lower valve is in *P. serbicus* of a more triangular shape, and round in *P. slovenicus*. *P. dechaseauxae* has a very thick stem, a thicker and broader posterior side of distal part of the head at ligamental column in

the late ontogenetic stage, a concave upper valve and a more triangular outline of the cross-section of its highest part, in comparison to species *P. slovenicus*.

A relatively thick head of the ligamental column have next to the species *P. serbicus* and *P. dechaseauxae* also species *P. ljubicae* Sladić-Trifunović, *P. ovalis* Milovanović, *P. manjae* Milovanović & Sladić, *P. giganteus* Milovanović & Sladić, *P. balcanicus* Milovanović & Sladić, *P. bacevicensis* Milovanović & Sladić, *P. boljevacensis* Sladić-Trifunović and *P. robustus* Sladić-Trifunović (SLADIĆ-TRIFUNOVIĆ, 1983, 1986, 2004; SLADIĆ-TRIFUNOVIĆ & CAMPOBASSO, 1980), although they differ in other characteristics from species *P. slovenicus* to such a degree that the latter must be considered a distinct species.

Acknowledgement

The authors would like to thank Mr. Ivan Štrukelj (Bitež) and Mr. Stanislav Bačar (Gorica Museum: Stanislav Bačar's collection at Ajdovščina) for enabling a loan of the fossil for study, and Mr. Mladen Štumbergar and Mr. Stane Zakrajšek for technical support. The investigation was financially supported by the Slovenian Research Agency (programme number P1-0011).

References

- BUSER, S. 1986: Tolmač listov Tolmin in Videm (Udine). Osnovna geološka karta SFRJ 1 : 100.000. Zvezni geološki zavod (Beograd), 103 str.
- BUSER, S. 1987: Osnovna geološka karta SFRJ 1 : 100.000, list Tolmin in Videm. Zvezni geološki zavod, Beograd.
- BUSER, S., PEJOVIĆ, D. & RADOIČIĆ, R. 1988: Re-deposited Rudists in Senonian and Paleocene Flysch Beds in the wider Region of the Soča Valley. First Intern. Conf. on Rudists, Abstracts, 3, Belgrade.
- KOSSMAT, F. 1906: Das Gebiet zwischen dem Karst und dem Zuge der Julischen Alpen. Jb. Geol. k. k. R.-A. (Wien) 56/2: 259–276.
- KOSSMAT, F. 1908: Beobachtungen über den Gebirgsbau des mittleren Isonzogebietes. Verh. k. k. Geol. R.-A. (Wien) 2–3: 69–84.
- KOSSMAT, F. 1909: Der küstenländische Hochkarst und seine tektonische Stellung. Verh. k. k. Geol. R.-A. (Wien) 4–5: 85–124.
- KOSSMAT, F. 1913: Die adriatische Umrandung in der alpinen Faltenregion. Mitt. Geol. Ges. (Wien) 6: 61–165.
- KOSSMAT, F. 1920: Nachtrag zur geologischen Spezialkarte der österr.-ung. Monarchie. SW Gruppe Nr. 90. Tolmein, Wien.
- KUŠČER, D., KUŠČER-KROŠL, N. & SKABERNE, D. 1976: Olistostrome v flišu pri Anhovem (zahodna Slovenija). 8. jugoslovanski geološki kongres 2, Ljubljana.
- MILOVANOVIĆ, B. 1939: Usporedna anatomija i filogenetski odnosi lapeirouseiina. Glas Srpske kraljevske akademije, CLXXX, prvi razred (Beograd) 89: 171–237, 6 tab.
- MILOVANOVIĆ, B. & SLADIĆ, M. 1957: Les nouvelles espèces du genre Pseudopolyconites Mil. Vesnik Zavoda za geol. i geof. istr. NRS (Beograd) 13: 194–240, 6 pl.
- PEJOVIĆ, D. 1996: *Pironea buseri* n.sp. from olistostromal breccia of Paleocene Flysch by Anhovo. Geologija (Ljubljana) 39: 91–95, 1 tab.
- PEJOVIĆ, D. & SLADIĆ-TRIFUNOVIĆ, M. 1977: Prvi nalazak pseudopolikonita u sedimentima starijeg senona (First Occurrence of Pseudopolyconites in Older Senonian Sediments). Geološki anali Balkanskog poluostrva (Beograd) XLI: 175–180, 7 tab.
- PLENIČAR, M. 2005: Upper Cretaceous Rudists in Slovenia. Opera SAZU, 4. razr. (Ljubljana) 39: 1–255.
- PLENIČAR, M., JURKOVŠEK, B. & BUSER, S. 2001: Preloženi rudisti v paleocenskem flišu pri Anhovem. Geologija (Ljubljana) 44/1: 115–136, 7 tab.
- POGAČNIK, Ž., PAVŠIČ, J. & MEDEN, A. 2009: Geološki zapis – pokazatelj termičnih lastnosti laporovcev v temperaturnem območju dekarbonizacije. Materiali in tehnologije. Ljubljana (in press).
- SKABERNE, D. 2003: Mégaturbidites de la région d'Anhovo, Slovénie occidentale. V: DROBNE, K. (ur.). De la mer Adriatique aux Alpes Juliennes (Italie nord-orient et Slovénie occidentale) – un parcours géologique sans frontières. Ljubljana: Znanstveno raziskovalni center SAZU; Trieste: Dipartimento di scienze geologiche, ambientali e marine, Università, str. 72–75.
- SLADIĆ-TRIFUNOVIĆ, M. 1983: Paleontološke karakteristike i biostratigrafski značaj pseudopolikonita (Paleontological characteristics and biostratigraphic significance of Pseudopolyconites). Geološki anali Balkanskoga poluostrva (Beograd) 47: 217–309, 48 tab.
- SLADIĆ-TRIFUNOVIĆ, M. 1986: New Pseudopolyconite species from the Maastrichtian of Eastern Serbia. Glasnik Prirodnačkog muzeja (Beograd) 40/41, Série A: 97–127, 7 tab.
- SLADIĆ-TRIFUNOVIĆ, M. 2004: On the evolution and Phylogeny, Biostratigraphy, Taksonomy of the Senonian Rudist Genus Pseudopolyconites. Bulletin T. CXXVIII de l'Académie serbe des sciences et des arts, Sciences naturelles (Beograd) 42: 199–235, 12 Pls.
- SLADIĆ-TRIFUNOVIĆ, M. & CAMPOBASSO, V. 1980: Pseudopolikoniti i kolveraje iz mastrihta Podžarda (Poggiardo) u Apuliji (Pseudopolyconites and Colveraias from Maastrichtian of Poggiardo (Lecce, Puglia), Italy). Geološki anali Balkanskog poluostrva (Beograd) XLIII–XLIV: 273–286, 7 tab.
- WINKLER, A. 1920: Das mittlere Isonzogebiet. Jb. geol. R.-A., Wien.
- WINKLER, A. 1923: Über den Bau der östlichen Südalpen. Mitt. geol. Ges., (Wien) 16.
- WIONTZEK, H. 1934: Rudisten aus der oberen Kreide des Mittleren Isonzogebietes. Palaeontographica (Stuttgart) 80: 1–40, 1 tab.

Navtilid iz srednjeeocenskih plasti pri Grdoselu v Istri na Hrvaškem

A nautiloid from Middle Eocene beds at Grdoselo in Istria, Croatia

Vasja MIKUŽ

Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, Privoz 11, SI-1000 Ljubljana, Slovenija; e-mail: vasja.mikuz@ntf.uni-lj.si

Prejeto / Received 3. 4. 2009; Sprejeto / Accepted 17. 4. 2009

Ključne besede: navtilidi, *Aturia*, srednji eocen, Grdoselo, Istria, Hrvaška
Key words: Nautiloidea, *Aturia*, Middle Eocene, Grdoselo, Istria, Croatia

Izvleček

V prispevku so obravnavani ostanki kamenega jedra fragmokona eocenskega navtilida vrste *Aturia* cf. *ziczac* (Sowerby, 1812) iz Grdosela v osrednji Istri. Aturijini ostanki so iz horizonta apnenčevih peščenjakov megasekvence pazinskega flišnega bazena. V teh plasteh je veliko morskih ježkov rodov *Echinolampas* in *Cyclaster*, veliko manj je primerkov rodov *Macropneustes* in *Conoclypus*. Od mehkužcev so praviloma najdena samo njihova kamena jedra. Relativno majhna diverzitetata morskih ježkov, veliko število posameznih vrst in popolna odsotnost koral, do neke mere kažejo na to, da so v tem najdišču ostanki organizmov najverjetneje ostali blizu njihovega nekdanjega življenjskega prostora in nimajo alohtonega predznaka.

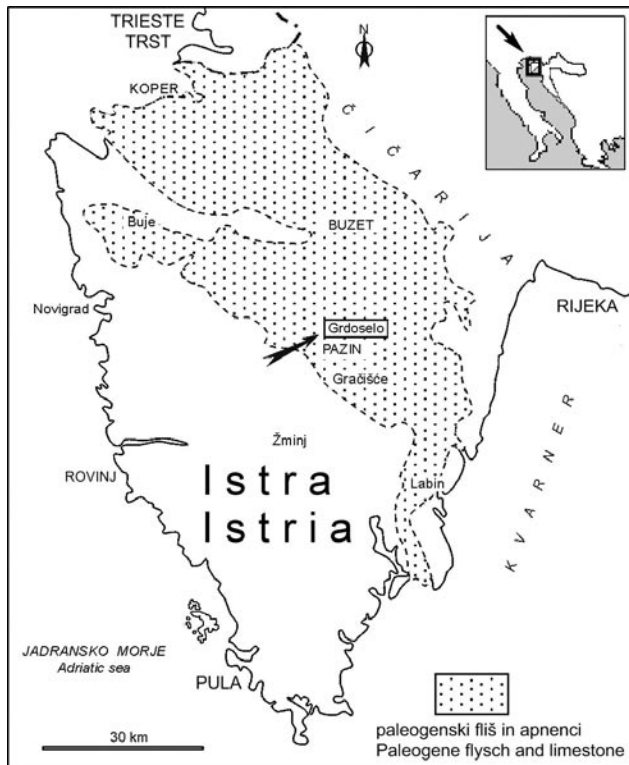
Abstract

Treated are remains of a stone core of phragmocone of an Eocene nautiloid of species *Aturia* cf. *ziczac* (Sowerby, 1812) from Grdoselo in central Istria, western Croatia. Remains of *Aturia* occur in a calcareous sandstone horizon of the Pazin flysch basin megasequence. In these beds occur abundant sea urchins of genera *Echinolampas* and *Cyclaster*, and much less frequent specimens of genera *Macropneustes* and *Conoclypus*. Of mollusks are normally found only their stone cores. The relatively modest diversity of sea urchins, high numbers of individual species and total absence of corals might indicate that organisms of this locality most probably remained near their original living environment, without a sign of allochthonicity.

Uvod

V flišnem pasu Istre je veliko najdišč eocenske makrofavne. Med pomembnejšimi najdišči je vsekakor Grdoselo (sl. 2), ki leži okrog 10 km severno od Pazina (sl. 1). S Pazinom ga povezuje ozka in ovinkasta cesta. Grdoselo je v geološkem smislu poznano predvsem po številnih ostankih iregularnih morskih ježkov, ki sta jih v preteklosti raziskovala predvsem TARAMELLI (1874) in BITTNER (1880). V 20. stoletju je istrske eocenske morske ježke raziskovala MITROVIĆ-PETROVIĆEVA (1970), v zadnjem času pa so z raziskavami nadaljevali MIKŠA in sodelavci (2005). Pregled vseh opisanih istrskih eocenskih vrst morskih ježkov je zbral MIKUŽ (2008). Da bi ugotovili pogostnost omenjenih fosilnih ostankov, smo naredili na manjši površini zelo plitev poizkusni izkop. V najdišču izdanja večja ploskev eocenske flišne megasekvence, na površini katere je videti določene že štrleče fosilne ostanke.

V sistematično izkopanem pasu dolžine 2,5 m, širine 25 cm in globine 10 cm, torej v 0,0625 m³ materiala smo našli 23 morskih ježkov, od tega 11 ehinolampasov in 12 ciklastrov. S tem smo dokazali, da so ostanki morskih ježkov v zgornjem delu plasti, ki izdanja v najdišču pri Grdoselu (sl. 3), zelo pogostni. Razen morskih ježkov so pogostne tudi numulitine in foraminifere, redkejša so kamena jedra polžev in školjk, zelo poredkoma pa naletimo na ostanke glavonožcev, členonožcev in mnogoščetincev. Za najdišče Grdoselo oziroma za povsem določen horizont flišne megasekvence je značilna odsotnost koral, čeprav MIKŠA in sodelavci (2005, 101) pišejo tudi o najdbah koral, najverjetneje iz kakega drugega horizonta? Precej pogostna so tudi ravna in ukrivljena, dolga ter kratka cevasta kamena jedra, ki so najverjetneje ostanki bioturbacijskih tvorb oziroma zapolnitve nekdanjih rovov v morskem dnu.



Sl. 1. Geografski položaj Grdosela v osrednji Istri
Fig. 1. Geographic position of Grdoselo in Central Istria

Pri večkratnem pregledovanju najdišča smo samo enkrat naleteli tudi na ostanke eocenskih glavonožcev. Našli smo tri dele kamene jedra frogmokona, ki pripadajo rodu *Aturia*. Aturijini segmenti so medsebojno povezljivi in so zanesljivo od istega osebka.

Dosedanje raziskave eocenskih navtilidov v Istri

STACHE (1864, 87) omenja iz Istre samo eno vrsto glavonožca *Nautilus lingulatus* Buch., ki je najden v Nugli pri Buzetu. PARONA (1898, 159) piše, da mu je prof. Taramelli posredoval lep primerek vrste *Aturia ziczac* s hriba Kanuš pri Pazinu. Nadalje še piše, da ga je prof. E. Mariani opozoril na večji

primerek iste vrste iz eocenskih skladov Pična, ki je shranjen v Mestnem muzeju v Milanu (Museo civico di Milano). SCHUBERT (1905, 179) navaja spisek fosilnih ostankov iz Istre. V seznamu sta omejena tudi glavonožca *Nautilus umbilicaris* Desh. iz okolice Pazina in *Nautilus (Aturia) ziczac* Sow. (*lingulatus* Desh.) iz okolice Pazina in Nugle pri Buzetu. MANEK (1905, 351–352) omenja nekaj lokalitet v Istri, okolico Raspoličev, Nugle, Lesiščine in Cunja, kjer so našli tudi ostanke rodu *Nautilus*. TONIOLO (1909, 290–291) opisuje dva navtilida iz Istre: *Nautilus disculus* Deshayes iz najdišč Semič in Sergovija pod Vranjo in *Nautilus cf. lamarkii* Deshayes najden ob potoku pri Sergoviji pod Vranjo. TOULA (1918, Taf. 25, Fig. 31) omenja, da so primerke vrste *Nautilus (Aturia) lingulatus* v. Buch. našli v Kressenbergu in v Istri. SACCO (1924, 20–21) predstavlja obsežen seznam fosilnih ostankov iz najdišč na območjih Roča, Pazina, Gračišća in od drugod. Isti avtor še navaja, da glavonožci rodu *Nautilus* niso redki, najde pa se tudi kakšna *Aturia*. ŠIKIĆ (1963, 331) v seznamu fosilnih ostankov iz okolice zaselka Brtoši pri Pazinu omenja vrsto *Nautilus sindensis* Vredenburg. Z otoka Krka pri Murvenici je navedena vrsta *Nautilus (Paraturia) spathi* Vredenburg (ŠIKIĆ 1963, 332). POLŠAK & ŠIKIĆ (1973, 26) omenjata iz pazinskega območja tri oblike glavonožcev: *Nautilus leonicensis*, *N. sindensis* in *N. subfleuriasianus*. ABATE in sod. (1988) predstavljajo iz srednjeocenskih skladov Grdosela v Istri tri vrste: *Eutrephoceras imperialis* (Sowerby) (Tav. 4, Figs. 14–15), *E. disculus* (Deshayes) (Tav. 4, Fig. 20) in *Hercoglossa* aff. *harrisi* Miller & Thompson (Tav. 4, Fig. 16). Iz istega najdišča omenjajo tudi vrsto *Aturia ziczac* (Sowerby, 1812). MOOSLEITNER (1996, 107) povzema podatke po SCHUBERTU (1905) in navaja dve obliki navtilidov, ki so jih našli v Istri: *Nautilus umbilicaris* Deshayes in *Nautilus (Aturia) ziczac* Sowerby. MIKŠA in sodelavci (2005, 101) omenjajo iz lutetijskih skladov Grdosela med makrofavno tudi ostanke navtilidnih glavonožcev.

V marcu leta 2007 smo si ogledali eocenske fosilne ostanke iz Istre, ki so shranjeni v depojih Prirodoslovnega muzeja v Trstu (Museo di Sto-



Sl. 2. Zaselek Grdoselo z jugovzhodne smeri
Fig. 2. Small village Grdoselo from southeast direction

ria Naturale, Trieste). Kdaj so bili najdeni in kdo jih je našel, ne vemo. Vsekakor pripadajo starejši zbirki. Med številnimi morskimi ježki in kamenimi jedri mehkužcev, sta tudi dva dela kamenega jedra glavonožca, določena kot *Nautilus* sp. (inv. št. 9465). Oba ostanka sta iz Grdosela.

Paleontološki del

Sistematika po: KUMMEL, 1964 in SCHULTZ, 1976 a, b

Classis Cephalopoda Cuvier, 1795
Subclassis Nautiloidea Agassiz, 1847
Ordo Nautilida Agassiz, 1847
Superfamilia Nautilaceae Blainville, 1825
Familia Nautilidae Blainville, 1825

Genus *Aturia* Bronn, 1838

Rodovno ime *Aturia* izvira iz poimenovanja miocenskega glavonožca vrste *Nautilus aturi* Basterot, 1825 (KUMMEL 1964, K457). KEFERSTEIN (1862–1866, 1429) navaja za genotip vrsto z imenom *Nautilus aturici*. Za rod pravi, da ima izrazito involutno hišico. Septa imajo kolumelarni lobus, z veliko stransko zajedo in manjšim začetnim lobusom. Sifo je na konkavni strani.

Če rodovno in vrstno ime izvirata iz latinščine, kar je najbolj verjetno, potem je beseda *Aturus* (*Aturrus*) starodobno ime za reko Adour v nekdanji provinci Akvitaniji na jugozahodu Francije (WIESTHALER 1993, 380). Po podatkih SOKLIČA (2001, 267) ime *Aturia* izvira iz grške besede »atyroo« kar pomeni v srbščini – ne zamrsiti oziroma v slovenščini ne zavozlati, ne zapletati ali ne zamotati. Glede izvora rodovnega imena je bolj verjetna prva verzija, saj je leta 1825 Basterot napisal razpravo o geoloških zapisih iz okolice Bordeauxa, ki leži prav v območju nekdanje akvitanjske province, reka Adour pa na njenem jugu. Miocenski glavonožec vrste *Aturia aturi* (Basterot, 1825) je prav iz tega predela Francije in je poimenovan po reki Adour. Koncem oktobra 2008, ko je bil ta prispevek že napisan, smo iz Švice prejeli naročeno kopijo BASTEROT-ovega originalnega članka iz leta 1825. Na strani 17, kjer obravnava navtilide iz južnozahodne Francije, je v poglavju Les Céphalopodes zapisano: »**1. N. de l'Adour. N. Aturi. Nob.**«. Slednji zapis dokončno razkriva poreklo rodovnega in vrstnega imena miocenskega navtilida *Aturia aturi* ali »navtilusa iz Adourja«. Torej smo sklepali pravilno, saj imeni dejansko izvirata iz nekdanjega poimenovanja reke Adour, miocensko vrsto *A. aturi* pa je BASTEROT (1825) poimenoval kot *Nautilus Aturi*.

Rod *Aturia* uvršča KUMMEL (1964) k družini Aturiidae Chapman, 1857. SHULTZ (1976) isti rod uvršča k družini Nautilidae Blainville, 1825. KUMMEL (1964, K457) in ARDUINI & TERUZZI (1986, 85) omenjajo, da je rod *Aturia* živel od paleocena do miocena v vseh morjih sveta, torej je bil rod v takratnih geoloških obdobjih kozmopolitski. Vanda KOCHANSKY-DEVIDÉ (1964, 163) piše, da

so glavonožci podrazreda Nautiloidea ločenega spola, torej pri njih obstaja spolni dimorfizem, ki se vidi pri odebeljenih hišicah pri samicah, so pa tudi razlike v velikosti hišic in oblikovanosti ustja. To je zadosten in zelo tehten razlog za do sedanje napačno določevanje fosilnih vrst.

Aturia cf. *ziczac* (Sowerby, 1812)

Tab. 1, sl. 1–3

- cf. 1824–37 *Nautilus zigzag*. Sow. – DESHAYES, 51, Tome 2, Pl. 100, Fig. 2
cf. 1825 *Nautilus Ziczac* de Sowerby – BASTEROT, 18
cf. 1837 *Nautilus Deshayesii* Defr. – DE KONINCK, 5, Tome 11, Pl. 4
cf. 1859 *Aturia zigzag* Sowerby – CHENU, 72, Figs. 272–273
cf. 1863 *Nautilus lingulatus* Bch. – SCHAFFHÄUTL, Taf. 53, Figs. 8a–b
cf. 1867 *Nautilus zic-zac* Sowerby – QUENSTEDT, 414
cf. 1867 *Nautilus lingulatus* Buch – QUENSTEDT, 414
cf. 1887 *Aturia ziczac* Sow. sp. – GEINITZ, 54, taf. 3, Figs. 1, 2
cf. 1894 *Aturia zic-zac* Sow. – DE GREGORIO, Pl. 1, Fig. 3a–3c
cf. 1906 *Aturia ziczac* Sow. – FELIX, 144, Fig. 420
cf. 1913 *Aturia ziczac* – WOODWARD, 46
cf. 1918 *Nautilus (Aturia) lingulatus* v. Buch – TOLLA, Taf. 25, Fig. 31
cf. 1949 *Nautilus (Aturia) ziczac* – PETKOVIĆ, 150, Tab. 28, sl. 4
cf. 1954 *Aturia ziczac* (Sow.) – MALARODA, 73, Tav. 14, Figs. 7–8
cf. 1954 *Aturia ziczac* (Sow.) – MALARODA, 74, Figs. 4a–c
cf. 1954 *Aturia ziczac* (Sow.) *maior* n. v. – MALARODA, 74, Tav. 14, Figs. 9a–9b
cf. 1955 *Aturia alabamensis* (Morton) – SHIMER & SHROCK, 549, Pl. 225, Figs. 10, 11
cf. 1964 *Aturia alabamensis* (Morton) – KUMMEL, K457, Fig. 337, 1c
cf. 1976a *Aturia (Aturia) ziczac lingulata* (v. Buch, 1834) – SCHULTZ, 51, Abb. 1, H
cf. 1988 *Aturia ziczac* (Sowerby, 1812) – ABATE, BAGLIONI, BIMBATTI & PICCOLI, Tav. 4, Figs. 17–18
cf. 1992 *Aturia lingulata* (v. Buch) – HAGN, DARGA & SCHMID, 180–181, Taf. 51
cf. 1995 *Aturoidea ziczac (Nautilus:)* Sowerby, 1812 – LE RENARD & PACAUD, 132
cf. 1995 *Aturia* sp. – TARLAO, TUNIS & VENTURINI, 615, Pl. 2, Fig. 2 left
cf. 1998 *Aturia (Aturia) ziczac lingulata* (v. Buch) – SCHULTZ, 38–39, Taf. 11, Figs. 3, 4

Material: Trije kosi kamenega jedra, ki so sestavni deli istega primerka. Kasneje so bili sestavljeni v en večji kos kamenega jedra nekdanjega glavonožca iz skupine paleogenskih navtilidov.

Nahajališče: V neposredni bližini stare domačije na obrobju Grdosela (sl. 3) izdanjajo debele plasti srednjeocenskega-lutetijskega apnenčeve-



Sl. 3. Horizont srednjeeocenskih peščenih apnencev v Grdoselu s številnimi makrofosili

Fig. 3. Middle Eocene packstone horizon in Grdoselo with many macrofossils

ga klastita (packstone), katerega sestavni delci so iz karbonata, vmes so še številni fosilni ostanki. Vezivo je bolj peščeno, zato kamnina hitreje razpada in prepeveva.

Opis: Ohranjeni so posamezni deli kamenega jedra, ki so deloma razpadli. Vsi deli pripadajo istemu fragmokonu. Površina ene strani je naravno izpreparirana. Po sestavnih delih najdbe vidimo, da je bila hišica spiralno zavita in involutna (tab. 1, sl. 1–2). Zadnji zavoj je prekrival starejše dele zavojnice, zavoj ima v prerezu polovalno oziroma nekako vmesno obliko med črkama »V« in »U« (tab. 1, sl. 3). Oblikovanost lobne linije primerka iz Grdosela povsem ustreza lobni liniji glavonožcev rodu *Aturia* (tab. 1, sl. 2). Lobna linija se začne s poglobljenim odsekom pri popku, nato se dvigne v kratek izbočeni del (sedlo), sledi vbočeni odsek (lobus), ki prehaja v najdaljše in najbolj izbočeno srpasto sedlo. Ta se blizu zunanjšega roba spusti v globoko zajedo (lobus), ki se pri robu hišice izravna. Posamezni sestavni deli kamenega jedra so izrazito srpaste oblike in so podobnih velikosti. Odprtina sifonalnega kanala (sifa) je ovalna (tab. 1, sl. 3), leži na konkavni strani blizu osrednjega oziroma notranjega dela hišice, zato pripada intrasifonalnemu tipu. Po polmeru sklepamo, da je imela hišica premer okrog 17 cm.

Opozarjamo tudi na uporabo različno zabeleženih vrstnih imen *Ziczac*, *zigzag*, *zic-zac* in *ziczac*, kar je bolj ali manj posledica površnosti in nedoslednosti nekaterih avtorjev. Morda gre tudi za nepoznavanje zooloških nomenklaturnih pravil.

Danes sta v uporabi rodovno ime *Aturia* in vrstno ime *ziczac*, torej *Aturia ziczac*!

Dimenzije kamenega jedra – fragmokona

(tab. 1, sl. 1–3):

(Dimensions of stone core – phragmocone)

(pl. 1, figs. 1–3):

velikost vzorca (Size of sample) = 140 x 77 mm
 največji polmer kamenega jedra (The greatest core radius) = ~ 100 mm
 širina sept (Width of septum) = 8–12 mm
 širina lateralnega roba (Width of lateral edge) = 17–25 mm
 polmer (Radius) = 85 mm
 širina kamenega jedra (Width of the core) = 41,5 mm
 razdalja od zunanjšega roba do sredine kanala (Distance from outer edge to the center of siphuncle) = 42 mm
 velikost sifonalnega kanala (Size of siphuncle) = 9 x 4,5 mm

Primerjava: Istrski primerek ima sifonalni kanal na istem mestu kot primerki vrste *Aturia ziczac*, ki jih predstavlja MALARODA (1954, 74, Fig. 4 a–c). Oblikovanost in velikost zavoja v prerezu in lobna linija pa bolj ustrezajo primerku podvrste *Aturia ziczac maior* (MALARODA 1954, 75, Figs. 5a–5b). KUMMEL (1964, K456) predstavlja z risbo rod *Aturia*, ki po zgradbi ustreza tudi našemu primerku iz Grdosela. Tudi oblika zavoja v prečnem prerezu in pozicija sifonalnega kanala ustrezata, saj so zavoji polovalni in kanal je lociran v sredini notranjega dela zavoja. Prav tako je zelo primerljiv potek lobne linije. Začetni del lobne linije je širok in izbočen, preide v navzdol zavihano ozko zajedo, nato lobna linija zavije rahlo navspred in zaključi pravokotno proti zunanjemu robu zavoja. Sifonalni kanal je ovalne oblike. WALKER in WARD (1995, 140) prikazujeta iz eocenskih plasti Egipta primerki vrste *Aturia praezigzac* Oppenheim. Sturna linija tega primerka je v marsičem zelo podobna sturni liniji istrskega primerka. Le diameter egiptovskega primerka je bistveno manjši.

Največja primerljivost in podobnost vseh glavnih morfoloških elementov primerka iz Grdosela je s primerki vrste *Aturia lingulata* (v. Buch) iz Bavarske, ki jih prikazujejo SCHAFHÄUTL (1863, Taf. 53, Figs. 8 a–b) in HAGN in sod. (1992, Taf. 51). Primerki kamenega jedra iz Alabame, ki ga GEINITZ (1887, Taf. 3) predstavlja kot *Aturia ziczac*, je tudi zelo primerljiv z istrskim primerkom. V določenih elementih je primerki iz Istre primerljiv še z obliko *Aturia rovasendiana* iz Piemonta, ki jo je določil PARONA (1898; Tav. 1, Fig.1).

Pripomba: Vrsta *Aturia lingulata* (L. Buch) najverjetneje ni nova oblika eocenskega glavonožca, ampak sinonim vrste *Aturia ziczac* (Sowerby, 1812). Vendar je obstajala možnost, da je ravno obratno. Domneva se je pojavila zato, ker nismo vedeli, kdaj je Buch določil vrsto *Aturia lingulata*,

pred Sowerbyjem ali za njim? Ko smo našli članek SCHULTZA (1976a) in ga pregledali smo videli, da je naveden podatek tudi o letnici avtorstva. SCHULTZ (1976a, 51, Abb.1H) navaja podvrsto *Aturia (Aturia) ziczac lingulata* (v. Buch, 1834). Isto letnico najdemo tudi v delu GEINITZA (1887, 54). Če je letnica 1834 prava, potem je L. v. Buch postavil novo vrstno ime *lingulata* za Sowerbyjem, torej je v veljavi prvo ime *Aturia ziczac*. SCHULTZ (1998, 38) omenja in predstavlja iz eocenskih plasti Avstrije podvrsto imenovano *Aturia (Aturia) ziczac lingulata*. Torej je združil obe navedeni vrstni imeni. Po našem prepričanju je že določevanje vrst problematično, kaj šele podvrst, kar je ponavadi še bolj zahtevno, velikokrat zelo vprašljivo in pri fosilnih ostankih največkrat nepotrebno.

Stratigrafska in geografska razširjenost: BASTEROT (1825, 18) poroča, da so vrsto *Nautilus Ziczac* de Sowerby našli v najdišču Highgate blizu Londona. DE KONINCK (1837, 5) omenja več različnih navtilidnih oblik in predstavlja notranji odtis fosilnega navtilida (Pl. 4) iz najdišča Schelle v Belgiji, omenja pa še najdišči Highgate iz Anglije in Dax iz Francije. CHENU (1859, 72) prikazuje vrsto *Aturia zigzag* Sowerby iz londonskih glin. QUENSTEDT (1867, 414) omenja vrsto *Nautilus lingulatus* Buch iz najdišča Kressenberg na Bavarskem in iz Istre, vrsto *Nautilus zic-zac* Sowerby pa iz londonskih glin. GEINITZ (1887, 54–56) omenja vrsto *Aturia ziczac* Sow. iz eocenskih plasti najdišča Claiborne v Alabami, iz londonskih glin in Kressenberga pri Traunsteinu, najdišča Mokattam pri Kairu in iz Libanona. FELIX (1906, 144) piše, da so vrsto *Aturia ziczac* Sow. našli v srednjeeocenskih skladih Anglije. COSSMANN & PISSARRO (1907–1913) omenjata vrsto *Aturia ziczac* (Sow.) iz thanetijskih in cuisijjskih skladov Francije. WOODWARD (1913, 46) prikazuje vrsto *Aturia ziczac* iz spodnjeeocenskih londonskih glin. FABIANI (1915, 259) poroča o petih glavonožcih iz lutetijskih skladov najdišč Monte Postale in S. Giovanni Ilarione v Venetu v severni Italiji, omenjena je tudi vrsta *Aturia zic-zac* Sow. MALARODA (1954, 74) poroča, da so vrsto *Aturia ziczac* našli v eocenskih skladih Italije, Nemčije (Bavarska), Švice, Egipta, Libije, Francije, Anglije in ZDA (Florida, Alabama, Georgia, Louisiana). Rajko PAVLOVEC (1959, 399, sl. 9) poroča, da so v zgornjееocenskih skladih najdišča Djapo v okolici Drniša našli kameno jedro navtilida velikosti 41 x 27 mm. Vanda KOCHANSKY-DEVIDÉ (1964, 167) piše, da so v istrskem eocenu najdena kamena jedra manjših navtilidov. ARDUINI in TERUZZI (1986, 85) predstavljata primerek oligocenske aturije iz Piemonta v Italiji. ABATE in sodelavci (1988, 153) pišejo, da je vrsta *Aturia ziczac* ugotovljena v paleocenskih in srednjeeocenskih skladih. V Italiji so jo našli v spodnje in srednjeeocenskih plasteh, v Grdoselu v Istri v srednjeeocenskih-lutetijskih plasteh. Našli so jo še v Angliji, Franciji (Pariška kotlina), Švici, na Bavarskem v Nemčiji, Egiptu, Libiji in v Združenih državah Amerike. Isti avtorji še navajajo, da je ameriška vrsta *Aturia alabamensis* (Morton, 1834) sinonim vrste *Aturia ziczac*. HAGN in sod. (1992, 180) pred-

stavljajo dva lepa primerka vrste *Aturia lingulata* (v. Buch) iz lutetijskih plasti najdišča Kressenberg na Bavarskem. Najdbe navtilidov omenjajo tudi iz spodnjeeocenskih skladov južnega dela Pirenejev v Španiji (MARTINIUS, 1995, 17, 29), vendar ne aturij. TARLAO in sod. (1995, 616) predstavljajo iz lutetijskih skladov hribca Kanuš, ki je južno od zaselka Rogovići blizu Pazina v Istri, dve navtilidni obliki: *Aturia* sp. in *Nautilus disculus*. SCHULTZ (1998, 38) piše o podvrsti glavonožca *Aturia (Aturia) ziczac lingulata*, ki je bila najdena v cuisijjskih in lutetijskih skladih Avstrije.

Če povzamemo zgornje podatke o stratigrafski in geografski razširjenosti vrste *Aturia ziczac* ugotavljamo, da je najdena pretežno v srednje in manjkrat v spodnjeeocenskih skladih Francije, Anglije, Belgije, Nemčije, Švice, Italije, Avstrije, Hrvaške, Egipta, Libije in Združenih držav Amerike.

Seznam eocenskih navtilidov iz Istre

Navtilidne vrste, ki so ugotovljene na ozemlju Istre so navedene v tabeli 1. Nomenklatura ni spremenjena, taksonomija je zapisana tako kot v originalnih delih navedenih avtorjev. Velika večina omenjenih primerkov iz Istre nima podatkov o velikostih in je brez slikovnega gradiva. Ker istrski navtilidi niso zadostno dokumentirani, zato določitve niso preverljive.

Zanimiva je trditev TARLAOJA in sodelavcev (1995, 615), ki pišejo, da so ostanke istrskih aturij prvokrat predstavili oni, morda slikovno? Ostanke aturij so bili v Istri registrirani že davno, zanesljivo pa že v drugi polovici 19. stoletja (STACHE, 1864) in (QUENSTEDT, 1867), v začetkih 20. stoletja (SCHUBERT 1905; TOULA, 1918 SACCO 1924) ter sedem let pred razpravo italijanskih avtorjev (ABATE et al., 1988), kar je razvidno v seznamu eocenskih navtilidov Istre (tab. 1).

Zaključki

Predstavljeni so razmeroma skromni, vendar razpoznavni ostanke kamenega jedra glavonožca vrste *Aturia* cf. *ziczac* (Sowerby, 1812) iz srednjeeocenskih skladov Grdosela v Istri. Na navedeno taksonomsko enoto sklepamo predvsem po zelo značilnem poteku suturne linije, po položaju sifonalnega kanala oziroma sifa in oblikovanosti zavojev. V omenjenem najdišču so ostanke glavonožcev zelo redki, saj so najdeni samo trije deli njihovega fragmokona, ki so prikazani združeno v anatomskem zaporedju na tab. 1, sl. 2.

Lutetijski skladi najdišča pri Grdoselu v Istri so izredno bogati z makrofavno. Lahko bi celo trdili, da gre za debelejšo plast ali horizont apnenčevega debelozrnatega peščenjaka (packstone) s številnimi morskimi ježki, v katerem so pretežno ehinolampasi, manj je ciklastrov, zelo redke so najdbe konoklipusov in makropneustesov. Raziškovane plasti pri Grdoselu bi lahko poimenovali kot »horizont z iregularnimi morskimi ježki«. Če-

Tabela 1. Eocenski navtilidi iz Istre

Table 1. The Eocene nautiloids from Istria

Vrste navtilidov Species of nautilida	Avtorji Authors	Najdišča v Istri Finding places in Istria
<i>Nautilus lingulatus</i> Buch	STACHE, 1864	Nugla pri Buzetu
<i>Nautilus lingulatus</i> Buch	QUENSTEDT, 1867	Istra
<i>Aturia ziczac</i>	PARONA, 1898	Kanuš pri Pazinu
<i>Aturia ziczac</i>	PARONA, 1898	Pičan
<i>Nautilus umbilicaris</i> Desh.	SCHUBERT, 1905	okolica Pazina
<i>Nautilus (Aturia) ziczac</i> Sow. (<i>lingulatus</i> Desh.)	SCHUBERT, 1905	okolica Pazina, Nugla
<i>Nautilus</i> sp.	MANEK, 1905	okolica Nugle, Cunj, Lesiščina
<i>Nautilus disculus</i> Deshayes	TONIOLO, 1909	Semič, Sergovija pod Vranjo
<i>Nautilus</i> cf. <i>lamarcki</i> Deshayes	TONIOLO, 1909	Sergovija pod Vranjo
<i>Nautilus (Aturia) lingulatus</i> Buch	TOULA, 1918	Istra
<i>Nautilus</i> sp.	SACCO, 1924	Roč, Pazin, Gračišće in drugod
<i>Aturia</i> sp.	SACCO, 1924	Roč, Pazin, Gračišće in drugod
<i>Nautilus sindensis</i> Vredenburg	ŠIKIĆ, 1963	Brtoši, južnozahodno od Pazina
<i>Nautilus sindensis</i> Vredenburg	POLŠAK & ŠIKIĆ, 1973	območje Pazina
<i>Nautilus leonicensis</i>	POLŠAK & ŠIKIĆ, 1973	območje Pazina
<i>Nautilus subfleuriausianus</i> d'Archiac	POLŠAK & ŠIKIĆ, 1973	območje Pazina
<i>Eutrephoceras imperialis</i> (Sowerby)	ABATE et al., 1988	Grdoselo
<i>Eutrephoceras disculus</i> (Deshayes)	ABATE et al., 1988	Grdoselo
<i>Hercoglossa</i> aff. <i>harrisi</i> Miller & Thompson	ABATE et al., 1988	Grdoselo
<i>Aturia ziczac</i> (Sowerby)	ABATE et al., 1988	Grdoselo
<i>Aturia</i> sp.	TARLAO et al., 1995	hribec Kanuš, južno od zaselka Rogovići
<i>Nautilus disculus</i>	TARLAO et al., 1995	hribec Kanuš, južno od zaselka Rogovići

prav so primerki vrste *Conoclypus conoideus* med morskimi ježki zelo redki, so najbolj markantni. V tem horizontu so najdeni še ostanki foraminifer, polžev, školjk, glavonožcev, mnogoščetincev, rakovic in mahovnjakov. Presenetljivo je, da v najdišču dosedaj nismo našli nobenih koral, čeprav MIKŠA in sodelavci (2005, 101) omenjajo iz Grdosela tudi ostanke navtilidnih glavonožcev in koral. Očitno je v Grdoselu več najdišč eocenske makrofavne, tako da so ostanki koral najverjetneje iz nekega drugega najdišča ali celo iz nižje ali višje ležečega horizonta?

Grdoselo in Pazin z okolico so že dalj časa poznani po najdiščih različnih eocenskih fosilov, tudi po glavonožcih. Italijanski raziskovalci (ABATE et al., 1988; 153, tav. 4, figs. 14–16, 20) predstavljajo iz Grdosela kar tri različne oblike navtilidov: *Eutrephoceras imperialis*, *E. disculus*, *Hercoglossa* aff. *harrisi*. Iz istega najdišča je samo v besedilu istega članka omenjena tudi vrsta *Aturia ziczac*. V našem prispevku navedeni in uporabljeni literarni viri nudijo podatke, iz katerih je razvidno, da je v eocenskih skladih Istre ugotovljenih kar deset različnih navtilidnih oblik (tabela 1). Takšna diverziteteta je bolj malo verjetna. Nekatero določitev istrskih navtilidov in njihova vrstna imena so zelo vprašljiva. Večina raziskovalcev pri določitvah ni upoštevala spolnega dimorfizma pri navtilidih, pa tudi ohranjenost fosilnih ostankov istrskih glavonožcev je razmeroma slaba.

A nautiloid from Middle Eocene beds at Grdoselo in Istria, Croatia

Conclusions

Presented are relatively modest, but recognizable remains of stone core of a cephalopod of species *Aturia* cf. *ziczac* (Sowerby, 1812) from Middle Eocene beds at Grdoselo in Istria. The named taxonomic unit has been addressed primarily because of the very characteristic passage of external suture, position of siphonal canal resp. of siphuncle, and morphology of whorls. In the named locality remains of cephalopods are very rare. Found were only three parts of their phragmocone, shown here combined in anatomic succession on Pl. 1, Fig. 2.

Lutetian beds of the locality at Grdoselo in Istria are very rich in macrofauna. The deposit could be described as a thicker bed or horizon of calcareous coarse grained packstone with numerous sea urchins among which abound echinolampases, less frequent are cyclasters, and very rare finds of conoclypuses and macropneustes. The studied beds at Grdoselo could be named as a "horizon with irregular sea urchins". Although the individuals of species *Conoclypus conoideus* are very rare among the sea urchins, they are the most imposing. In the horizon were found also remains of

foraminifers, gastropods, bivalves, cephalopods, polychaetes, crabs and bryozoans. Surprisingly in the locality no corals have been found so far, although MIKŠA and coworkers (2005, 101) mention from Grdoselo also remains of nautiloid cephalopods and corals. Evidently there are at Grdoselo several Eocene macrofauna localities, so that coral remains most probably come from an other locality, or even from a higher or lower horizon?

Grdoselo and Pazin with surroundings have been known since long by localities of various Eocene fossils, also of cephalopods. Italian researchers (ABATE et al., 1988; 153, tav. 4, figs. 14–16, 20) present from Grdoselo three distinct nautiloid forms: *Eutrephoceras imperialis*, *E. disculus* and *Hercoglossa* aff. *harrisi*. From the same locality is mentioned, in text of that paper only, also the species *Aturia ziczac*. Literature sources listed and used in our present paper contain data from which follows that in Eocene beds of Istria not less than ten various nautiloid forms were recorded (Table 1). Such a diversity is not very probable. Certain determinations of Istrian nautiloids and their specific names are highly questionable. The majority of researchers did not take in consideration at determination the sexual dimorphism in nautiloids, and also the state of preservation of Istrian cephalopods is relatively bad.

Zahvale

Za prevode v angleščino se zahvaljujemo prof. dr. Simonu Pircu, za fotografske in druge tehniške usluge pa sodelavcu Marijanu Grmu.

Literatura – References

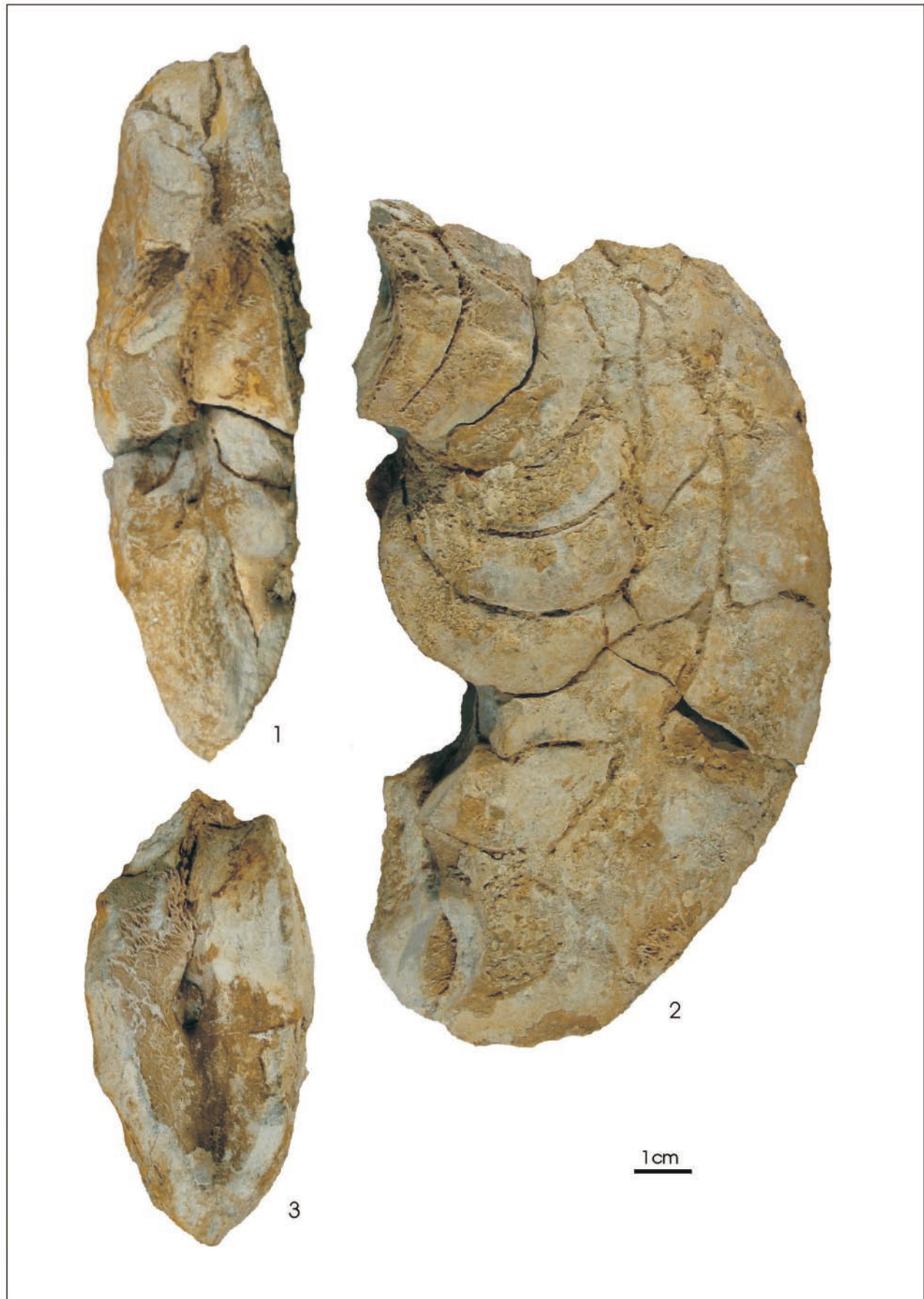
- ABATE, A., BAGLIONI, A. R., BIMBATTI, C. & PICCOLI, G. 1988: Rassegna di molluschi marini bentonici e neotonici del Cenozoico triveneto. *Memorie Sci. Geol., Mem. Ist. Geol. Miner. Univ. Padova* (Padova) 40: 135–171, Tav. 1–4.
- ARDUINI, P. & TERUZZI, G. 1986: *Fossili*. Arnoldo Mondadori Editore (Milano): 1–319.
- BASTEROT, B. de 1825: Description géologique du bassin tertiaire du sud-ouest de la France, (avec) description des Coquilles fossiles des environs de Bordeaux. *Mém. Soc. Hist. Natur. Paris* (Paris) 2: 1–100, Pl. 1–7.
- BITTNER, A. 1880: Beiträge zur Kenntniss altertärer Echinidenfaunen der Südalpen. I. Echinidenfauna des istro-dalmatinischen Eocaens. *Beiträge Palaeont. Oesterreich.-Ungarn* (Wien) 1 (1): 43–71, Taf. 1–8.
- CHENU, J. C. 1859: Manuel de Conchyliologie et de paléontologie conchyliologique. Tome premier. Librairie Victor Masson (Paris): VII+1–508.
- COSSMANN, M. & PISSARRO, G. 1907–1913: *Iconographie complete des Coquilles fossiles de l'Éocène des Environs de Paris*. Tome 2, Scaphopodes, Gastropodes, Brachiopodes, Céphalopodes et supplément. (Paris): Planches 1–65.
- DE GREGORIO, M. A. 1894: Description des faunes Tertiaires de la Vénétie. *Monographie des fossiles Éocéniques (Étage Parisien) de Mont Postale*. *Annales Géol. Paléont.* (Turin-Palermo) 14: Pl. 1–9.
- DE KONINCK, L. 1837: Description des Coquilles Fossiles de l'Argile de Basele, Boom, Schelle, etc. *Mém. Acad. Roy. Sci. et Bell.-Lett. Bruxelles* (Bruxelles) 11: 1–37, Pl. 1–4.
- DESHAYES, G. P. 1824–1837: Description des coquilles fossiles des environs de Paris. Tome second, Mollusques, Gastéropodes. (Paris): 1–809, (Expl. des pl. 1–51), Pl. 1–101.
- FABIANI, R. 1915: Il Paleogene del Veneto. *Mem. Ist. Geol. R. Univ. Padova* (Padova) 3: XVI+1–336, Tav. 1–9.
- FELIX, J. 1906: Die Leitfossilien aus dem Pflanzen- und Tierreich in systematischer Anordnung. Verlag von Veit & Comp. (Leipzig): X+1–240.
- GEINITZ, H. B. 1887: Ueber *Nautilus Alabamensis* Morton, *Nautilus ziczac* Sow. und *Nautilus lingulatus* v. Buch. *N. Jb. Min. Geol. Palaeont.* (Stuttgart) 2: 53–56.
- HAGN, H., R. DARGA & SCHMID, R. 1992: Erdgeschichte und Urwelt im Raum Siegsdorf. Fossilien als Zeugen der geologischen Vergangenheit. Gemeinde Siegsdorf (München): 241 s., (Taf. 1–80).
- KEFERSTEIN, W. 1862–1866: Dr. H. G. Bronn's Klassen und Ordnungen der Weichthiere (Malacozoa), wissenschaftlich dargestellt in Wort und Bild. Bd. 3/2. C. F. Winter'sche Verlagshandlung (Leipzig und Heidelberg): 521–1500, Taf. 45–135.
- KOCHANSKY-DEVIDÉ, V. 1964: Paleozoologija. Izdavačko poduzeće »školska knjiga« (Zagreb): XI+1–451.
- KUMMEL, B. 1964: Nautiloidea – Nautilida. In: R. C. Moore, (Editor), *Treatise on Invertebrate Paleontology, Part K, Mollusca 3*. The Geological Society of America and The University of Kansas Press (Lawrence): K383–K457.
- LE RENARD, J. & PACAUD, J.-M. 1995: Révisoin des Mollusques Paléogènes du bassin de Paris. II-Liste des références primaires des especes. *Cossmanniana* (Paris) 3/3: 65–132.
- MALARODA, R., 1954: Il luteziano di Monte Postale (Lessini Medî). *Memorie Ist. Geol. Miner. Univ. Padova* (Padova) 19: 1–107, Tav. 1–14.
- MANEK, F. 1905: Neue Fundorte von Eocänfossilien bei Rozzo (Istrien). *Verh. Geol. R. A.* (Wien): 351–352.
- MARTINIUS, A. W. 1995: Macrofauna associations and formation of shell concentrations in the Early Eocene Roda Formation (southern Pyrenees, Spain). *Nation. Naturhist. Mus.*, 175, *Scripta Geologica* (Leiden) 108: 1–39, (Pl. 1–5).
- MIKŠA, G., MEZGA, A. & ČOSOVIĆ, V. 2005: An Example of Mixed Echinoid Fauna from the Lutetian of Grdoselo, Central Istria. *Knjiga sažetaka – Abstract Book, 3. Hrvatski geološki kongres – 3rd Croatian Geological Congress, Opatija 2005*. Hrvatski geološki institut – Croatian Geological Survey (Zagreb): 101–102.
- MIKUŽ, V. 2008: Pregled novih vrst eocenskih morskih ježkov iz Istre, opisanih v 19. in 20. stoljetju. (Revision of new species of Eocene sea

Tabla 1 – Plate 1

- 1 Prečni prerez kamenega jedra vrste *Aturia* cf. *ziczac* (Sowerby, 1812) iz Grdosela v Istri na Hrvaškem.
Transverse cross section of stone core of *Aturia* cf. *ziczac* (Sowerby, 1812) from Grdoselo in Istria in Croatia.
- 2 Notranji odtis z značilno suturno linijo vrste *Aturia* cf. *ziczac* (Sowerby, 1812) iz Grdosela v Istri.
Internal mould with characteristic suture line of *Aturia* cf. *ziczac* (Sowerby, 1812) from Grdoselo in Istria.
- 3 Položaj in oblika sifa v delu fragmokona iz Grdosela.
Situation and form of siphuncle in the part of phragmocone from Grdoselo.

Fotografije (Photos): Marijan Grm

Tabla 1 – Plate 1



- urchins from Istria, described in the 19th and 20th centuries). *Geologija* (Ljubljana) 51/1: 13–28, (Tab. 1–4).
- MITROVIĆ-PETROVIĆ, J. 1970: Eocenski ehinidi Jugoslavije. *Geol. anali Balk. pol.* (Beograd) 35: 151–190, Tab. 1–37.
- MOOSLEITNER, G. 1996: Fossilien aus dem Mittel-Eozän von Istrien. *Fossilien (Korb)* 2: 105–110.
- PARONA, C. F. 1898: Note sui cefalopodi terziari del Piemonte. *Palaeontographia Italica* 4: 155–168, Tav. 12–13 (1–2).
- PAVLOVEC, R. 1959: Zgornjeocenska favna iz okolice Drniša. *Razprave IV. razreda SAZU* (Ljubljana) 5: 349–416, (Tab. 1–2).
- PETKOVIĆ, K. V. 1949: Kratak kurs istorijske geologije. (Predavanja). *Naučna knjiga* (Beograd): 1–212, (Tabl. 1–35).
- POLŠAK, A. & ŠIKIĆ, D. 1973: Tumač za list Rovinj. Osnovna geološka karta SFRJ 1 : 100 000. Savezni geološki zavod Beograd (Beograd): 1–51.
- QUENSTEDT, A. 1867: *Handbuch der Petrefaktenkunde*. Zweite Auflage. Verlag der H. Laupp'schen Buchhandlung (Tübingen): VIII+1–982.
- SACCO, F. 1924: L'Istria. *Cenni geologici generali. Memorie descrittive della Carta geologica d'Italia* (Mondovi) 19: 1–105.
- SCHAFHÄUTL, K., 1863: Süd-Bayerns Lethaea Geognostica. Der Kressenberg und die südlich von ihm gelegenen Hochalpen geognostisch betrachtet in ihren Petrefacten. (Leipzig): XVII+1–487, Taf. 1–86.
- SCHUBERT, R. J. 1905: Zur Stratigraphie des istrisch-norddalmatinischen Mitteleocän. *Jb. Geol. R. A. (Wien)* 55: 153–188.
- SCHULTZ, O., 1976 a: Zur Systematik der Nautilidae. *Anzeiger Österr. Akad. Wiss., mathem.-naturwiss. Kl. (Wien)* 1976/H. 6: 43–51.
- SCHULTZ, O. 1976 b: *Eutrephoceras (Eutrephoceras) traubi* nov. spec. – ein neuer Nautilus aus dem Paleozän Österreichs. *Annal. Naturhistor. Mus. Wien* (Wien) 80: 233–237, (Taf. 1–3).
- SCHULTZ, O. 1998: Tertiärfossilien Österreichs. Wirbellose, niedere Wirbeltiere und marine Säugetiere. *Goldschneck-Verlag (Korb)*: 1–159, (Taf. 1–65).
- SHIMER, H. W. & SHROCK, R. R. 1955: *Index Fossils of North America. A new work based on the complete revision and reillustration of Grabau and Shimer's "North American Index Fossils"*. John Wiley & Sons, Inc., Chapman & Hall, Limited (New York, London): IX+1–837, (Pl. 1–303).
- SOKLIĆ, I. 2001: Fosilna flora i fauna Bosne i Hercegovine. In: B. Matić, (urednik), *Akademija nauka i umjetnosti Bosne i Hercegovine, Djela knj. 74, Odjelenje tehn. nauka* (Sarajevo) 9: XII+1–585.
- STACHE, G. 1864: Die Eocengebiete in Inner-Krain und Istrien. *Jb. Geol. R. A. (Wien)* 14: 11–115.
- ŠIKIĆ, D. 1963: Eine Vergleichende Darstellung der Entwicklung des jüngeren klastischen Paläogens in Istrien, dem Kroatischen Küstenland und Dalmatien. *Geol. vjesnik* 1961 (Zagreb) 15/2: 329–336.
- TARAMELLI, T. 1874: Di alcuni Echinidi eocenici dell'Istria. *Atti R. Ist. Veneto Sci. (Venezia)* ser. 4/3: 3–28, Tav. 3–4.
- TARLAO, A., TUNIS, G. & VENTURINI, S. 1995: Lutetian Transgression in Central Istria: the Rogovići-Mečari Section Case. In: Vlahović, I., Velić, I. & M. Šparica, (urednici), *Zbornik radova* 2, 613–618, (Pl. 1–2), 1. Hrvatski geološki kongres Opatija, Institut za geološka istraživanja, Zagreb.
- TONIOLO, A. R. 1909: L'Eocene dei dintorni di Rozzo in Istria e la sua fauna. *Palaeontographia Italica, Mem. Paleont. (Bologna)* 15: 237–295, Tav. 24–26.
- TOULA, F. 1918: *Lehrbuch der Geologie. Ein Leitfaden für studierende*. Alfred Hölder (Wien und Leipzig): XI+1–556, Taf. 1–30.
- WALKER, C. & WARD, D. 1995: *Fossils. Eyewitness Handbooks*. Dorling Kindersley (London, New York, Stuttgart): 1–320.
- WIESTHALER, F. 1993: *Latinsko-slovenski slovar. A-Col. Založba Kres* (Ljubljana): 1–650. (Zbirka Veliki slovarji)
- WOODWARD, B. H. 1913: *Stanford's Geological Atlas of Great Britain and Ireland with plates of characteristic fossils. Fourth edition*. Edward Stanford, Ltd. (London): XII+1–214, (Pl. 36–50).

Geologija avtocestnega predora Pletovarje

Geology of Pletovarje motorway tunnel (Slovenia)

Tomaz BUDKOVIČ¹, Magda ČARMAN¹ & Borut PETKOVŠEK²

¹Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ul. 14, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
e-mail: tomaz.budkovic@geo-zs.si; magda.carman@geo-zs.si

²Zavod za gradbeništvo, Dimičeva ul. 12, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
e-mail: borut.petkovsek@zag.si

Prejeto / Received 14. 1. 2009; Sprejeto / Accepted 25. 3. 2009

Ključne besede: avtocestni predor, greben Pletovarje, Južne Karavanke, Donačka prelomna cona, triasni dolomit, smrekovška serija, tektonika, Slovenija

Key words: motorway tunnel, Pletovarje ridge, Southern Karavanke, Donat fault zone, triassic dolomite, Smrekovec serie, tectonics, Slovenia

Izvleček

Štajerska avtocesta prečka greben Pletovarje skozi istoimenski predor. Seka najvzhodnejši del tektonske enote Južnih Karavank. Glede na kamnine, ki jih je presekal predor, ločimo tri značilne odseke: ožje območje Donačke prelomne cone, sestavljeno iz tektonskih leč različnih litostratigrafskih enot (paleozojske, triasne in terciarne starosti), neplastnat spodnjetriasni dolomit ter na smrekovško serijo oligocenske starosti. Prelomi so večinoma usmerjeni v smeri vzhod–zahod in so subvertikalni.

Abstract

Styrian motorway crosses the Pletovarje ridge through the tunnel having the same name. It intersects the most eastern extension of the Southern Karavanke tectonic unit. Considering geological conditions, the tunnel could be divided into three sections: the inner Donat / Donačka fault zone composed of tectonic lenses of different lithostratigraphic units (of paleozoic, triassic and tertiary age), massive dolomite (lower triassic) and Smrekovec series of oligocene age. Main faults have east – west direction and are subvertical.

Uvod

Dvocevni avtocestni predor Pletovarje je del Štajerske avtoceste med Celjem in Mariborom (sl. 1). Vzhodna cev se nahaja med cestnima stacionažama 29 791 m in 30 515 m. Dolga je 724 metrov, najvišje nadkritje nad cevjo pa znaša 138 m. Gradilo jo je podjetje SCT leta 1995. Zahodno cev, dolgo 722 metrov, so leta 1974 in 1975 gradili Italijani. Takrat so izkopali tudi portalni del vzhodne cevi in zaščitili oba portala. Na območju Donačke prelomne cone se je izvajalcu zgodil zrušek do površine.

Geološka zgradba območja predora je zelo pestra, saj ta poteka skozi najbolj vzhodni del tektonske enote Južnih Karavank. Predor seka Donačko prelomno cono, ki ima na listu Celje smer vzhod–zahod oz. je rahlo odklonjena proti severozahodu. Seka tudi pletovarsko antiklinalo, ki jo sestavljajo oligocenske in miocenske plasti.

Prvotna antiklinala (južno krilo) je ohranjena le še na skrajnem zahodnem delu te strukture, med-

tem, ko je proti vzhodu severno krilo odrezano ob Donačkem prelomu (BUSER, 1979).

Pregled geoloških raziskav območja predora

Regionalne geološke raziskave

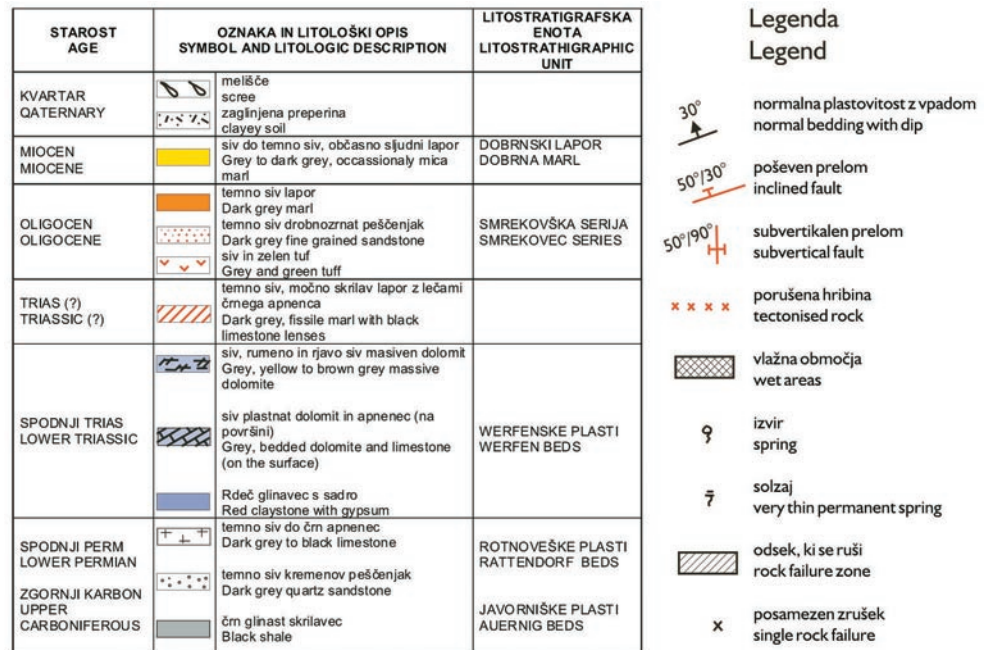
Podatki starejših geoloških raziskav, ki obravnavajo širše območje, so povzeti iz OGK karte in Tolmača za list Celje (BUSER, 1979).

V drugi polovici 19. stoletja, v obdobju Avstro-Ogrske, so obravnavano ozemlje prvi geološko preučevali Zollikofer, Stur, Hoernes, Teller in Dreger. Takrat je bilo območje zanimivo zaradi rudnikov rjavega premoga (Zreče, Makole), ki so delovali v bližini.

V času Kraljevine Jugoslavije sta nastali razpravi avstrijskih geologov Kieslingerja o Labotski prelomni coni in Winklerja o zgradbi vzhodnega dela Južnoapneniških Alp.

Sl. 1. Dejanski osni prerez in tloris vzhodne cevi predora Pletovarje

Fig. 1. Axial cross-section and ground plan of the Pletovarje tunnel east tube



Obširnejše regionalne geološke raziskave so se pričele po drugi svetovni vojni. Predterciarne kamnine na Konjiški gori je pregledno kartiral A. Ramovš leta 1954. Med leti 1957 in 1960 je Geološki zavod Ljubljana pod vodstvom M. Hamrle raziskoval Mislinjsko-Dravinjsko premogovno območje. V letih 1960 in 1961 so A. Hinterlechner, M. Pleničar, A. Ramovš in Lj. Šribar podrobno kartirali Dravinjske gorice, Vzhodne Karavanke in severovzhodni del Celjske kotline. Karta, ki je prinesla številne nove ugotovitve, je ostala v rokopisni obliki v merilu 1 : 25 000.

V letih 1970 in 1971 je ekipa Geološkega zavoda Ljubljana pod vodstvom S. Buserja kartirala isto območje za Osnovno geološko karto SFRJ 1 : 100.000 – list Celje in v glavnem potrdila rezultate iz leta 1961.

Podrobne geološke raziskave za predor

Podrobne geološke raziskave za predor so potekale leta 1969 in 1970 (OGRIN, 1973). Obsegale so geološko, hidrogeološko in inženirskogeološko kartiranje v merilu 1 : 1000 približno 100 metrov širokega pasu nad predorom, izdelavo razkopov in vrtanje geomehanskih ter strukturnih vrtin. Na območju severnega portala zahodne cevi so izdelali štiri razkope in izvrtali šest navpičnih vrtin do nivelete predora, predvsem zaradi večkratnega prestavljanja trase predora. Na južnem portalu so naredili razkop in vertikalno vrtino. Z južnega portala so izvrtali 350 metrov dolgo vodoravno vrtino po osi predora, ki je dala orientacijske podatke o geološki zgradbi.

Geološki prognozni profil je izdelal F. Ogrin leta 1973. Razmere v zahodni cevi predora so napoved v celoti potrdile, zato lahko štejemo to študijo kot eno najboljših pri dosedanji predorogradnji v Sloveniji. Predvidene meje posameznih kamninskih

enot je pri nadkritju 130 m predvidel skoraj na meter natančno.

Za vzhodno predorsko cev ni bilo izvedenih dodatnih geoloških raziskav. Žal nismo mogli dobiti nikakršnih geoloških podatkov spremljave zahodne cevi, ki bi nam bili pri napovedi geoloških razmer v vzhodni cevi v veliko pomoč. Ravno tako nismo mogli dobiti fotografij čel, ki so bila fotografirana po vsakih štirih metrih napredka (STANKOVSKI, ustna informacija).

Metodologija geološke spremljave izkopa vzhodne cevi

Geološka spremljava izkopa vzhodne cevi je potekala po vzoru karavanškega cestnega predora (BUDKOVIČ, 1999). Obsegala je litološko, tektonsko, inženirskogeološko in hidrogeološko kartiranje vsakega odstrela na poseben obrazec merila 1 : 100, fotografiranje čela kalote in stopnice, odvzem vzorcev kamnin, beleženje in opredeljevanje zruškov ter izdelavo osnega prereza in tlorisa predora v merilu 1 : 100. Podatki o vseh teh značilnostih, ki jih podajamo v nadaljevanju, so zbrani v neobjavljenem poročilu »Geološka spremljava predora Pletovarje – vzhodna cev«, ki sta ga izdelala T. Budkovič in M. Čarman leta 1996.

Na podlagi podatkov iz predora in s površine smo izdelali dejanski geološki osni prerez in tloris vzhodne cevi v merilu 1 : 1000, ki sta v pomanjšanem merilu prikazana na sliki 1. V kolonah pod osnim prerezom so podani podatki o kategoriji hribine, litoloških značilnostih, litostratigrafski enoti in starosti, strukturnih značilnostih, hidrogeoloških pojavih in geološko pogojenih zruških. Na sliki so z rdečo barvo poudarjene le najmočnejše prelomne cone, ostalih tektonskih elementov z rdečo barvo nismo označili, ker bi sicer slika izgubila preglednost.

Litološke in tektonske značilnosti posameznih odsekov v predoru

Tektonsko močno porušene kamnine različnih starosti v ožjem območju Donačke prelomne cone (stacionaža od 29 791 do 29 975 metrov)

Od severnega vhoda do stacionaže 29 816 imamo podatke samo iz površinskih vrtin, saj je bil portalni del zabetoniran že ob izdelavi zahodne cevi.

Ožje območje Donačke prelomne cone, ki jo predor preči v dolžini okoli 200 m, sestavljajo subvertikalno ležeče leče različnih klastičnih in karbonatnih kamnin, ki starostno segajo od paleozoika do terciarja.

Kamnine paleozojske starosti so črn glinast skrilavec, temno siv kremenov peščenjak ter temno siv do črn apnenec. Za opredelitev starosti teh plasti nimamo neposrednih fosilnih dokazov, ampak samo litološko sličnost z onimi z območja zahodnega dela Karavank (OGORELEC et al., 1999). Tam pripadajo **javorniškim in rotnoveškim plastem** zgornje karbonske in spodnje permske starosti. V predoru se pojavijo v nekaj metrov širokih lečah na naslednjih stacionažah:

- od 29 854 do 29 862 kot temno siva tektonska glina iz močno pregnetenih klastičnih kamnin, ki vsebuje dva metra debelo lečo kremenov-sljudnega peščenjaka;
- od 29 868 do 29 882 kot siva tektonska glina z do dva metra debelimi lečami rdečega glinavca, temnosivega laporja in temnosivega kremenovo-sljudnega peščenjaka. Lapor in rdeč glinavec najverjetneje pripadata werfenskim plastem oz. spodnjemu triasu.
- od 29 894 do 29 901 kot močno pregneten črn glinast skrilavec ter tektonske leče svetlo in temnosivega masivnega apnenca.

V manjših, nekaj metrov debelih, tektonskih lečah se omenjene plasti pojavljajo še med stacionažama 29 889 do 29 944 m.

Na površini nad severnim portalom predora se pojavljajo bloki **trbiške breče** spodnje permske starosti, ki nastopa kot tektonski vklešček.

Werfenske plasti (spodnji trias) so zastopane z rdečim glinavcem s sadro, sivim plastnatim dolomitom in apnencem (samo na površini) in masivnim dolomitom sive, rumene in rjave barve. Najdemo jih na naslednjih stacionažah:

- od 29 882 do 29 889 kot rdeč skrilav glinavec, vgnete manjše leče svetlo sivega apnenca in črnega glinastega skrilavca (sl. 2);
- od 29 944 do 29 965 kot masiven dolomit svetlo sive, sive, sivo rumene in sivo rjave barve. Dolomit je pretrt in mestoma zdrobljen, s pogostimi tektonskimi drsami.

V obliki manjših tektonskih leč werfenske plasti najdemo še med stacionažama 29 868 in 29 882 ter 29 901 in 29 944.

Med stacionažama 29 925 in 29 940 predor poteka skozi temno siv, močno skrilav lapor z lečami

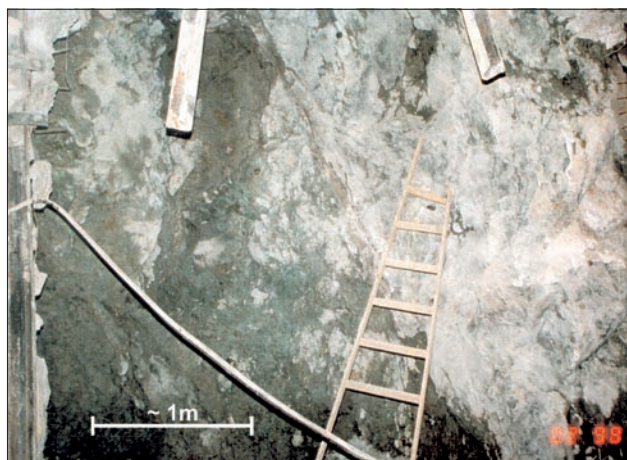


Sl. 2. Subvertikalni tektonski vkleščki werfenskih in karbonsko-permskih plasti v Donački prelomni coni, kalota na stacionaži 29 885 m

Fi. 2. Subvertical tectonical lenses of werfen and carboniferous-permian beds inside the Donat fault zone, head at chainage 29 885 m

črnega apnenca, rdeč keratofir z rdečim in zelenim keratofirskim tufom (verjetno iz srednjega ali zgornjega triasa, med 29 964 do 29 975 pa skozi črn skrilav lapor z do meter velikimi lečami črnega plastnatega apnenca.

Siv in zelen tuf **Smrekovške serije** (oligocen) nastopa v ožjem območju Donačke prelomne cone med stacionažama 29 820 in 29 841 (sl. 3).



Sl. 3. Tektonska leča tufa iz Smrekovške serije v Donački prelomni coni, stopnica na stacionaži 29 823m

Fig. 3. Tectonical tuff lense, Smrekovec series in Donačka fault zone, bench at chainage 29 823m

Dobrnski lapor miocenske starosti (siv do črn, občasno sljudnat laporovec z vložki peščenjaka) se pojavlja na več mestih v ožjem območju Donačke prelomne cone. Debelejše tektonske leče teh kamnin najdemo na naslednjih stacionažah:

- od 29 841 do 29 854 temno siv sljudni laporovec, močno skrilav, z lečami meljevca;
- od 29 862 do 29 868 temno siv do črn, skrilav do pregneten sljudni laporovec;
- od 29 901 do 29 915 temno siv skrilav sljudni laporovec z vgnetenimi lečami peščenjaka in dolomita.

Spodnjetriasni dolomit (stacionaža od 29 975 do 30 123 metrov)

Ta dolomit ni tipičen za werfenske plasti, zato smo ga izdvojili kot posebno litostratigrafsko enoto. Je neplastnat, temno sive, rjavo sive, rumeno sive in svetlo sive barve (sl. 4). Dolomit je zdrobljen ter delno spremenjen v milonitno moko. Milonitizirane cone so široke od nekaj decimetrov do nekaj metrov. Med stacionažama 30 110 do 30 125, kjer je dolomit plastnat, smo ugotovili prevrnjeno sinklinalo, katere osna ravnina vpada na sever.

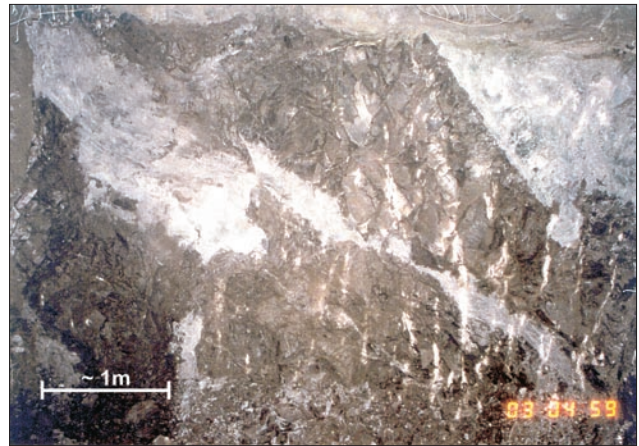


Sl. 4. Zdrobljen dolomit (spodnji trias), kalota na stacionaži 30 065 m

Fig. 4. Crushed dolomite (lower trias), head at chainage 30 065 m

Smrekovska serija (oligocen) (stacionaža od 30 123 do 30 497 metra)

Omenjeno litostratigrafsko enoto gradijo temno siv laporovec in glinavec, temno siv sljudnat in drobnozrnat peščenjak ter sivozelen tuf (sl. 5). Med stacionažama 30 123 in 30 164 m poteka predor skozi temno siv masivni glinavec in laporovec. Do stacionaže 30 213 sledita siv in zelen tuf ter temno siv laporovec. Plasti vpadajo proti jugovzhodu in severovzhodu. Med stacionažo 30 213 in 30 292 se menjavajo več kot meter debele plasti temno sivega laporovca, temno sivega peščenjaka ter sivega in zelenega tufa, ki vpadajo strmo na sever. Do že leta 1975 zabetoniranega južnega portala na stacionaži 30 496 prevladuje temno siv, večinoma



Sl. 5. Vložki svetlo sivega tufa v drobnozrnatem peščenjaku, stopnica na stacionaži 30 459 m

Fig. 5. The light grey tuff inclusions in sandstone, bench at chainage 30 459 m

drobnozrnat peščenjak, brez izrazite plastnatosti, z več kot meter debelimi lečami sivega in sivozelenega tufa. Laporovec praktično izgine. Leče tufa vpadajo strmo na sever ali jug, oziroma so subvertikalne, od stacionaže 30 460 naprej pa vpadajo na jugozahod.

Hidrogeološke razmere v predoru

Hidrogeološke razmere pred gradnjo je podal OGRIN leta 1973. Glavni vodonosnik je dolomit pletovarskega grebena, ki pa so ga odvodnili z gradnjo zahodne cevi. Hidrogeoloških opazovanj iz časa gradnje zahodne cevi nismo uspeli izslediti.

Največji vodni dotok v vzhodni cevi se je pojavil iz izolirane dolomitne leče, ki je tektonsko vkleščena v Donački prelomni coni na stacionaži 29 925 m. Dotok je znašal 2 l/s. Na odseku skozi glavni dolomitni masiv se v vzhodni cevi pojavljajo le močila. V vodi nismo ugotovili snovi, ki bi bile agresivne na beton.

Stabilnost predora

Gradnja predora je potekala po novi avstrijski metodi gradnje predorov (NATM). Ta metoda vključuje opazovanje stabilnosti predora s pomočjo meritev premikov, ki so v vzhodni cevi potekale v 26 merskih profilih. Največje vrednosti konvergenč so se pojavljale v ožjem območju Donačke prelomne cone na odseku, ki ga gradijo paleozojske klastične kamnine. Na tem odseku so bili vgrajeni trije merski profili, kjer so izmerili največje vrednosti konvergenč 1,7 cm (PETKOVŠEK, 1996; PETKOVŠEK & BUDKOVIČ, 1996). Tudi največji posedki stropa so se pojavili v tem delu. Posedek je malenkostno presegel vrednost 4 cm. Zaradi izdatnih podpornih ukrepov v tem delu predora ni prišlo do podobnih zruškov, kot pred 35 leti pri gradnji zahodne cevi, kjer je največji zrušek segal do površine (SOVINC, 1978).

Zaradi ocenjevanja vpliva izkopa vzhodne cevi je bilo v zahodni cevi vgrajenih šest merskih pro-

filov. Izkazalo se je, da gradnja vzhodne cevi ni vplivala na že obstoječo cev.

Zaključki

Predor Pletovarje je del Štajerske avtoceste. Geološke raziskave pred gradnjo zahodne cevi so obsegale podrobno geološko kartiranje, izdelavo razkopov, vrtnanje nekaj plitvih vrtin na portalih ter 350 m dolgo vodoravno vrtino, izvrtano po osi predora. Pred izkopom vzhodne cevi dvajset let kasneje ni bilo dodatnih raziskav. Geološka spremljava vzhodne cevi je potekala neprekinjeno. Po podatkih spremljave smo izdelali dejanski geološki prerez in tloris vzhodne cevi.

Predor seka najvzhodnejši del tektonske enote Južnih Karavank. Poteka skozi Donačko prelomno cono in Pletovarsko antiklinalo. Od severa proti jugu prečka tri različne odseke:

- a) notranji del Donačke prelomne cone, ki je kompleksno sestavljen iz tankih subvertikalnih tektonskih leč karbonskih, permskih, triasnih in terciarnih kamnin, v dolžini 184 m;
- b) spodnjetriasni dolomit v dolžini 148 m;
- c) Smrekovško serijo oligocenske starosti (lapor, peščenjak, tuf) v dolžini 374 m.

V predoru prevladujejo strmi prelomi smeri vzhod–zahod. Izjemna tektonska porušenost kamnin je posledica premikov ob Donački prelomni coni.

Vodni dotoki v vzhodni cevi so bili majhni, saj so dolomitni masiv pletovarskega grebena odvodnili že z izgradnjo zahodne cevi. Edini izvir z izdatnostjo 2 l/s se je pojavil ob prebitju karbonatne tektonske leče v notranjem delu Donačke prelomne cone.

Glede stabilnosti predora je najbolj kritičen odsek pri gradnji predora predstavljal izkop skozi notranji del Donačke prelomne cone. Pri gradnji zahodne cevi pred skoraj 35 leti je v tem območju nastal velik zrušek vse do površine. Tudi v vzhodni

cevi so se v tem delu pojavili večji posedki stropa, ki pa se zaradi takojšnjega ojačanega podpiranja niso razvili v večje zruške.

Zahvala

Avtorji se zahvaljujemo tehnični sodelavki Vidi Pavlici za pripravo prečnega in vzdolžnega profila predora Pletovarje za tisk.

Literatura

- BUDKOVIČ, T. 1999: Geology of the Slovene Part of the Karavanke Road Tunnel. *Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt (Wien)* 56/2: 35–48.
- BUDKOVIČ, T. & ČARMAN, M. 1996: Geološko geotehnična spremljava predora Pletovarje, leva – (vzhodna) cev. *Geologija*. Arhiv Geološkega zavoda Slovenije, Ljubljana (neobjavljeno).
- BUSER, S. 1979: Osnovna geološka karta SFRJ 1 : 100.000, Tolmač za list Celje. Zvezni geološki zavod Beograd, 1–62.
- OGORELEC, B., OREHEK, S. & BUDKOVIČ, T. 1999: Lithostratigraphy of the Slovenian Part of the Karavanke Road Tunnel. *Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt (Wien)* 56/2: 99–112.
- OGRIN, F. 1973: Inženirsko geološki pogoji za gradnjo avtoceste med Žičami in Dramljami. Diplomsko delo. Knjižnica odseka za geologijo NTF, Ljubljana.
- PETKOVŠEK, B. 1996: Geomehanske meritve v predoru Golo rebro. Arhiv Geološkega zavoda Slovenije, Ljubljana (neobjavljeno).
- PETKOVŠEK, B. & BUDKOVIČ, T. 1996: Underground crossing of one of the strongest fault zones in Slovenia. 3. mednarodno posvetovanje o gradnji predorov in podzemnih prostorov, 26.–28. 9. 1996, 117–125, Ljubljana.
- SOVINC, I. 1978: Geomehanske meritve pri gradnji predora Pletovarje v oligocenskih laporjih. *Gradbeni vestnik*, 27/ 6: 114–119, Ljubljana.

Tla na zgornjetriasnih karbonatnih kamninah Zahodnih Karavank in visokih planot Julijskih Alp

Soils on the Late Triassic carbonate rocks in the West Karavanke Mountains and the high plateaus of the Julian Alps (Slovenia)

Dragomir SKABERNE, Polona KRALJ & Tomaž BUDKOVIČ
Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
e-mail: dragomir.skaberne@geo-zs.si; polona.kralj@geo-zs.si; tomaz.budkovic@geo-zs.si

Prejeto / Received 13. 3. 2009; Sprejeto / Accepted 28. 3. 2009

Ključne besede: tla, mineralna komponenta, zrnavost, težki minerali, SEM strukture površine kremenovih zrn, Zahodne Karavanke, Julijske Alpe, Slovenija.

Key words: soils, mineral component, grain size, heavy minerals, SEM surface texture of quartz grains, West Karavanke Mountains, Julian Alps, Slovenia.

Izvleček

Analize zrnivosti, mineralne sestave težke in lahke frakcije ter strukture površin kremenovih zrn tal na različni karbonatni podlagi na območju Zahodnih Karavank in visokih planot Julijskih Alp (Mežakla, Pokljuka, Jelovica) so razkrile njihov poligenetski nastanek. Homogenost sestave težkih mineralov v tleh na različnih matičnih karbonatnih kamninah kaže, da je v sestavi mineralne komponente tal, poleg avtohtonega materiala (netopnega ostanka karbonatnih kamnin) prisoten tudi alohtoni (prinesen) material. Združba težkih mineralov kaže na metamorfo-magmatsko primarno izvorno območje, ki je najverjetneje v Centralnih Alpah, od koder naj bi material prenašal Dravski ledenik in ga odložil v tilih vzdolž Dravske doline. Po umiku ledu koncem würma so bili ti izpostavljeni rečni in eolski eroziji. Severni vetrovi so prenašali pretežno meljasti material tudi preko grebena Karavank. Ta se je začel odlagati na njihovih južnih, zavetrnih pobočjih in sedlih ter je segal proti jugu vsaj na območje visokih planot Julijskih Alp, verjetno pa še dalje.

Abstract

Grain-size analysis, mineral composition of heavy and light fraction, and surface texture of quartz grains in soils developed on different parent carbonate rocks in the region of the West Karavanke Mountains and the high plateau of the Julian Alps (Mežakla, Pokljuka, Jelovica) revealed their polygenetic origin. Homogeneity of the heavy mineral assemblage in the soils developed on different parent carbonate rocks indicates – besides autochthonous material (insoluble residue of carbonate rocks), the presence of allochthonous (external) material in the composition of mineral component of soils, too. Heavy mineral assemblage indicates a metamorphic-igneous source area, which is most probably in the Central Alps. The Drava glacier transported material from there, and deposited it in tills along the Drava valley. They were exposed to the fluvial and eolian erosion after the Würm deglaciation. Mostly silty material was transported over the ridges of the Karavanke Mountains by the northeren winds. Their deposition began on the southern calm and protected slopes and saddles, and continued southward on high plateaus of the Julian Alps, and very possibly even farther.

Uvod in oblikovanje hipoteze

Med leti 1987 in 1990 smo podrobno geološko kartirali slovensko (južno) stran Karavank. Namen kartiranja v merilu 1 : 5000 je bil tem boljše spoznati geološko zgradbo, da bi uspešneje napovedovali geološke razmere med napredovanjem karavanškega cestnega predora. Našo pozornost so takrat pritegnila več sto kvadratnih metrov velika območja, sklenjeno porasla z gosto travo, z rahlo valovitim površjem. Takšna območja se pojavljajo predvsem v sedlih vršnega grebena.

Razlikujejo se od ostalih delov pobočij, ki jih pokrivajo tanka tla, apnenčeve skale in grušč s šopi trave. Na Belski planini je ta talni pokrov debel več kot meter in so na ravnih predelih pastirji vanj izkopali plitve kotanje – kale, kamor se, zaradi neprepustne podlage, nabira deževnica za napajanje živine (sl. 1). Na sedlu med Veliko Golico in Kravko ima talni pokrov konveksno usločeno sipinasto obliko (sl. 2).

Pri podrobnejšem makroskopskem pregledu opazimo sorazmerno veliko količino lističev muskovita velikosti melja do drobnozrnatega pe-



Sl. 1. Valovito oblikovano površje z manjšim jezercem – kalo na sedlu nad Belsko planino.

Fig. 1. Undulatory landform with a small pond – kala in the saddle above the Belska planina plateau.

ska. Pri mikroskopskih preiskavah ekvivalentnih karbonatnih kamnin (dachsteinskega apnenca in karnijskega plastnatega temno sivenga apnenca z vložki roženca), ki so v podlagi tal, pa jih nismo zasledili. Glede na terenska opazovanja smo postavili hipotezo:

Mineralna komponenta tal na zgornjetriasnih apnencih v Karavankah na območju Golice in Struške (Belske planine) ne predstavlja le avtohtonega materiala, netopnega ostanka preperevanja matičnih apnencev, ampak tudi alohtoni, verjetno eolski material.

Kljub številnim študijam nastanek tal na karbonatnih matičnih kamninah še ni popolnoma razjasnjen. Nerazrešena je predvsem dilema deleža avtohtone komponente (netopnega ostanka karbonatnih kamnin) in alohtone komponente (materiala prinesenega od drugod) v sestavi mineralnega dela tal na karbonatnih kamninah.

Izbira metode za dokaz hipoteze in vzorčni načrt

Za ugotavljanje deleža alohtone komponente v sestavi tal na karbonatnih kamninah se običajno uporablja primerjava sestave (mineralne, kemične) in strukturnih lastnosti sestavnih faz mineralne komponente tal in netopnega ostanka karbonatnih matičnih kamnin v podlagi. Sestava mineralnih faz v tleh je odvisna od matične podlage in pedogenih procesov, na katere vplivajo predvsem klima, čas, topografija in organizmi. Med pedogenezo delujejo na mineralne faze matične kamnine različni procesi, pri katerih lahko prihaja do raztapljanja in spreminjanja mineralnih faz matične kamnine ter nastajanja novih mineralnih faz. Poleg vrste mineralne faze vpliva na stopnjo spremembe in/ali njeno hitrost tudi velikost zrn. Večja zrna imajo manjšo specifično površino od manjših zrn. Tako so pogosto spremembe večjih istovrstnih mineralnih zrn manjše in/ali počasnejše kot manjših. Zato smo se odločili, da bomo mi-



Sl. 2. Konveksno usločeno sipinasto oblikovan talni pokrov v sedlu med Veliko Golico in Krvavko.

Fig. 2 Concave curved dune formed soil cover in the saddle between Mt. Velika Golica and Mt. Krvavka.

neraloško preiskali frakcijo zelo drobnega peska velikosti 0,063 do 0,125 mm in posvetili posebno pozornost združbi težkih mineralov (minerali z gostoto večjo kot 2,87 g/cm³).

Zaradi dolgotrajnosti postopka pridobitve netopnega ostanka karbonatnih kamnin z raztapljanjem, smo se temu skušali izogniti s premišljenim načinom vzorčenja tal. Preverjanje hipoteze smo želeli izvesti s čim manjšimi stroški (število analiziranih vzorcev). Z vzorčevalnim načrtom smo zajeli dve spremenljivki: različno karbonatno matično kamnino in homogenost sestave tal v odvisnosti od oddaljenosti predpostavljene izvornega območja.

Z izborom tal na treh različnih karbonatnih matičnih kamninah smo preverili obstoj alohtone mineralne komponente tal. Izbrali smo tla na dachsteinskem apnencu (Struška – Belska planina, Pokljuka, Jelovica), karnijskem temno sivem apnencu z roženci (Golica) in karnijskem-cordevolskem dolomitu (Mežakla) (tabla 1). Pri tem smo predpostavili, da mineralna sestava netopnega ostanka teh različnih karbonatnih kamnin, ki tvori avtohtono komponento tal, ni enaka. Tako bi enaka združba težkih mineralov v tleh na različni matični kamnini kazala na njeno drugotno, alohtono poreklo.

Z vzorčenjem v »pasu« dolgem približno 22 km v smeri N–S smo skušali zajeti spreminjanje sestave združbe težkih mineralov v odvisnosti od oddaljenosti od predpostavljene izvornega območja. Vzorčne točke so bile razporejene od severa proti jugu: Karavanke (Struška – Belska planina, Golica), Mežakla, Pokljuka in Jelovica (sl. 3, tabela 1).

Geografske značilnosti vzorčevalnega območja in njegova geološka zgradba

Tla na zgornjetriasnih karbonatni podlagi smo vzorčili v Zahodnih Karavankah in na treh visokih planotah Julijskih Alp: Mežakli, Pokljuki in Jelovici. Na obravnavanem območju Karavank se na grebenu, po katerem poteka slovensko-avstrijska državna meja, najvišje dviga Veliki vrh (1944 m) v skupini Struška nad Belsko planino in Velika Golica (1835 m). Zahodne Karavanke loči od Julijskih Alp reka Sava, v dolini katere so na



Sl. 3. Karta dela Zahodnih Karavank in Julijskih Alp s položaji vzorčnih mest.

Fig. 3. Position map of the sampling sites in an area encompassing a part the West Karavanke and a part of the Julian Alps.

tem območju največje naselje Jesenice. Visoke planote Julijskih Alp dele doline rek Save Dolinke, Radovne in Save Bohinjke. Med Savo Dolinko in Radovno je Mežakla, ki se najvišje dviga v Jerebikovcu (1593 m). Sava Bohinjka loči Pokljuko na zahodu in Jelovico na vzhodu. Pokljuka se najvišje dviga v Mesnovcu (1539 m), Jelovica pa s Partizanskim vrhom (1411 m) v Dražgoški gori.

Na obravnavanem območju lahko podnebje označimo kot gorsko celinsko. Povprečno letno količino padavin in povprečno letno temperaturo podajamo za štiri najbližje ležeče meteorološke postaje Planina pod Golico, Radovna, Rovtarica in Stara Fužina (tabela 2) (<http://www.arso.gov.si/vreme/napovedi%20in%20podatki>). Podnebne razmere se zaradi reliefa (nadmorske višine) in lege spreminjajo. Zaradi sredozemskega vpliva povprečna letna temperatura proti jugu narašča, količina padavin pa se proti severu in vzhodu manjša.

Ozemlje je večinoma poraščeno z gozdovi. Na Pokljuki in delu Jelovice ter Mežakle prevladuje

vz.	y	X	Z	Vegetacija	Mat. kam.	O.G.K.
Be1	5 543 193	5 514 865	1720	travnik	dachsteinski apn.	Celovec
Be2	5 543 170	5 514 853	1735	travnik	dachsteinski apn.	Celovec
Be3	5 543 192	5 514 840	1730	travnik	dachsteinski apn.	Celovec
Be4	5 543 195	5 514 840	1730	travnik	dachsteinski apn.	Celovec
Go1_1	5 542 833	5 514 990	1720	travnik	karnijski apn. z roženci	Celovec
Go1_2	5 542 832	5 514 990	1720	travnik	karnijski apn. z roženci	Celovec
Me1	5 542 477	5 514 151	960	trav./gozd	karnijski dolomit	Celovec
Po1	5 541 975	5 513 280	1410	gozd	dachsteinski apn.	Tolmin
Je1	5 542 695	5 512 780	1040	gozd	dachsteinski apn.	Kranj

Tabela 1. Osnovni podatki o vzorcih tal

Table 1. Elementary data on samples of soils

y, x, z – koordinate vzorcev / coordinates of samples

Vegetacija/Vegetation – travnik / meadow, gozd/forest, trav./gozd / meadow/forest

Mat. kam. – matična kamnina / parent rock

O.G.K. – list Osnovne geološke karte Jugoslavije 1 : 100.000 / sheet of The Basic Geological Map of Yugoslavia 1 : 100.000

Tabela 2. Povprečna letna količina padavin in temperatura v bližnjih hidrometeoroloških postajah

Table 2. Mean annual precipitation and temperature recorded at near by hydrometeorological stations

postaja	n. višina m	obdobje leto	pov. pad. mm/m ²	pov. tem. °C
Planina pod Golico	970	1981-1990	1637	6,2
Radovna	630	1981-1990	1873	6,4
Rovtarica	1080	1961-1970	2075	3,7
Stara Fužina	547	1961-1990	2333	7,6
povprečje	807		1980	6,0

postaja / station, n. višina / altitude, obdobje / period, pov. pad. / mean annual precipitation, pov. tem. / mean annual temperature;

smrekov gozd, v območju Karavank pa bukov in mešani gozd. Nad gozdno mejo, ki je precej spremenljiva in je večinoma med 1500 in 1700 m, seže le greben Karavank. Na meji se pojavlja rušje, nad njo pa travnata ruša s planinskimi pašniki (Golica in Belska planina).

Tla na zgornjetriasnih karbonatnih kamninah predstavljajo večinoma rendzino (sl. 4), ponekod pa so se razvila debelejša rjava polkarbonatna tla (sl. 5).



Sl. 4. Rendzina na karnijskih apnencih z roženci na Golici.

Fig. 4. Rendzina on the Carnian limestone with chert on Mt. Golica.

Ozemlje, ki smo ga zajeli z vzorčenjem pokriva trije listi Osnovne geološke karte SFRJ, 1 : 100.000 (tabela 1, O.G.K.) Največji del ozemlja Zahodnih Karavank in Mežakle je prikazan na listu Celovec (BUSER & CAJHEN, 1978, BUSER, 1980), vzorčna točka na Pokljuki je na skrajnem severovzhodnem robu lista Tolmin in Videm (BUSER, 1987), vzorčna točka na Jelovici pa je na severozahodnem robu lista Kranj (GRAD & FERJANČIČ, 1974, 1976).

Tektonsko pripada celotno obravnavano ozemlje Južnim Alpam, ki jih na severu ločijo od Vzhodnih Alp Peradriatski, Labotski in Ljutomerski prelom, od Zunanjih Dinaridov na jugu pa Južnoalpska narivna meja in Savski prelom (PLACER, 2008). Znotraj Južnih Alp so izdvojene tri velike strukturne enote: Južne Karavanke (BUSER, 1980), Julijske Alpe kot narivna gruda in Slovenski bazen (PLACER, 1999; 2008).

Južne Karavanke so na severu omejene s Peradriatskim, na jugu pa s Savskim prelomom. Se-



Sl. 5. Rjava polkarbonatna tla na karnijskih apnencih z roženci na Golici.

Fig. 5. Calcitic Cambisol on the Carnian limestone with chert on Mt. Golica.

stavljajo jih zgornjepaleozojske kamnine Javorniške, Grödenske in Belerophonske (Karavanške) formacije ter spodnje do zgornjetriasne kamnine. V sklopu te enote so vzorčne točke na Golici in Belski planini. Ozemlje Južnih Karavank sekajo sistemi prelomov v dinarski (NW-SE), prečnodinarski (NE-SW) in alpski (E-W) smeri.

Južno do Savskega preloma so Julijske Alpe kot narivna gruda s Slatensko tektonsko krpo (Slatensko ploščo) (PLACER, 2008). Sestavljajo jih srednje in predvsem zgornjetriasne kamnine, na katerih so erozijski ostanki jurskih in krednih kamnin, v območju Bohinja pa tudi oligocenskih kamnin. V območju narivne grude Julijskih Alp so vzorčne točke na Mežakli, Pokljuki in Jelovici.

Narivna gruda Julijskih Alp je ob Krnsko-Koblanskem narivnem prelomu narinjena na Slovenski bazen (PLACER, 2008). Teža označujejo globljevodne triasne, jurske in kredne kamnine ter obsega predel predgorja Julijskih Alp. Paleogeografsko je Slovenski bazen v veliki meri ločeval Julijsko karbonatno platformo na severu in Dinarsko na jugu. Strukturno je Slovenski bazen od Zunanjih Dinaridov na jugu ločen z Južnoalpsko narivno mejo (PLACER, 1999, 2008). Narivno grudo Julijskih Alp in Slovenski bazen sekajo prelomi, med katerimi so najbolj izraženi dinarsko usmerjeni (NW-SE).

Preiskovalne metode

V vzorcih tal smo določili zrnavost, mineralno sestavo težke ($\rho > 2,87 \text{ g/cm}^3$) in lahke ($\rho <$

2,87 g/cm³) frakcije ter strukturo površine kremenovih zrn.

Zrnavost smo določili s klasično sejhalno in lasersko metodo. Pri pregledu posameznih s sejanjem ločenih velikostnih frakcij smo ugotovili, da pripadajo zrna večja od 250 µm le drobcem matične kamnine (dolomit in apnenec), organskim drobcem (delcem koreninic, iglicam, itd.) in redko okroglim zrnem železovih hidroksidov in oksidov, zato frakcij zrnavosti večjih od 250 µm pri nadaljnji analizi porazdelitve velikosti nismo upoštevali. Porazdelitev velikosti zrn v frakciji manjši od 250 µm smo določili z laserskim analizatorjem velikosti delcev (Laser-Particle-Sizer »analysette 22«) proizvajalca Fritsch. Meritve porazdelitve velikosti zrn smo izvedli v območju velikosti 0,18–250 µm z razdelitvijo na 62 kanalov.

Za določitev mineralne sestave smo velikostno frakcijo manjšo od 250 µm z mokrim sejanjem ločili na frakcije velikosti 125–250 µm, 63–125 µm, 40–63 µm in < 40 µm. Velikostni frakciji 63–125 µm in 40–63 µm smo z bromoformom ($\rho = 2,87 \text{ g/cm}^3$) ločili na težko in lahko mineralno frakcijo. Pri tem se je pokazalo, da ima velikostna frakcija 40–63 µm značilno ($p = 0,004$) večji delež težke mineralne frakcije, v kateri je relativni delež neprozornih mineralov manjši kot v primerjalni večji velikostni frakciji. Pri tem pa je potrebno opozoriti, da je bila v tej velikostni frakciji zaradi slabše ločitve težkih in lahkih mineralov, opazna tudi večja količina lahke mineralne frakcije. Mineralna sestava težke frakcije je bila določena z optičnim polarizacijskim mikroskopom. Podatki kvantitativne mineralne sestave težke frakcije so podani v številčnih relativnih deležih (No%). Za primerjavo je bila določena kvantitativna mineralna sestava težkih mineralov v treh vzorcih v obeh velikostnih frakcijah (63–125 µm in 40–63 µm). Primerjava srednjih vrednosti zastopanosti posameznih težkih mineralov s T-testom je pokazala, da so razlike v mineralni sestavi obeh frakcij neznačilne. Največja razlika s stopnjo zupanja $p = 0,135$ in $p = 0,121$ je bila pri določitvi količine stavrolita in zoisita. Zaradi neznačilnih razlik, lažjega prepoznavanja in možnosti nadaljnjih primerjav in korelacij smo se odločili, da bomo mineralno sestavo težke in lahke frakcije določali v velikostni frakciji 63–125 µm.

Mineralno sestavo lahke frakcije ($\rho < 2,87 \text{ g/cm}^3$) v velikostni frakciji 63–125 µm smo določili z rentgensko difrakcijsko metodo z difraktometrom PW 3710 proizvajalca Philips. Bakrovo anodo ($\lambda_{\text{K}\alpha} = 1,54056 \text{ \AA}$) smo napajali z napetostjo 40 KV in tokom 30 mA. Pri snemanju smo uporabljali nikljev filter, avtomatično divergentno zaslonko, sprejemno zaslonko z 0,2 mm široko režo in monohromator. Rentgenogrami so bili posneti v območju 2° do 70° 2 θ , s hitrostjo goniometra 2 $\theta = 2^\circ/\text{min}$. Vsak vzorec smo posneli dvakrat. Kvalitativno in kvantitativno smo difraktogram lahke frakcije analizirali s programom Micro powder diffraction search match (η PDSM) in določili posamezne mineralne faze. Za kvantitativno oceno zastopanosti posameznih mineralnih faz v lahki frakciji smo uporabili odštevanje jakosti difraktogramov stan-

dardov za posamezen mineral, s katerimi so bili kvalitativno in kvantitativno primerjani posneti difraktogrami. Tako prikazani relativni deleži (%) ne predstavljajo relativne utežne zastopanosti posameznih mineralov, ampak povprečje njihovih relativnih jakosti odbojev dveh neodvisno posnetih difraktogramov.

Strukturo površine kremenovih zrn smo pregledali v štirih vzorcih z območja Belce. Vzorce lahke frakcije, v enakem velikostnem območju 63–125 µm, kot so bile izvedene tudi druge preiskave, smo najprej pregledali pod stereo lupo in izbrali 50 do 60 zrn ter jih nalepili na ogljikov samolepilni trak. Vzorce smo neparili z ogljikom in jih opazovali v visokem vakuumu z vrstičnim elektronskim mikroskopom (SEM) JEOL JSM-6490LV z energijskim disperzijskim spektrometrom (EDS) Oxford INCA Penta FET-x3.

Rezultati in interpretacija

Rezultate raziskav podajamo v sklopih: zrnavost, mineralna sestava težke frakcije, mineralna sestava lahke frakcije in struktura površin kremenovih zrn.

Zrnavost

Rezultati analiz porazdelitev velikosti zrn manjših od 250 µm, določene z lasersko metodo, v tleh so prikazani v tabeli 3 in slikah 6 in 7.

Interpretacija

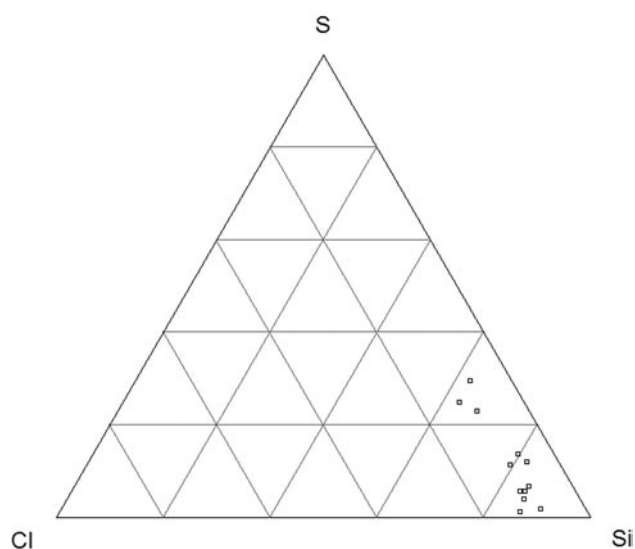
Pri interpretaciji granulometričnih podatkov bi lahko tudi ugovarjali, ker nismo podali granulometričnih analiz celotnih vzorcev, ampak zaradi že omenjenih razlogov, le frakcijo pod 250 µm. S tem smo odstranili celotno prodnato in del peščene frakcije, ki ju sestavljajo večinoma drobcu matične kamnine karbonatne sestave. Kljub temu so se razmerja med nekarbonatno meljasto in glinasto frakcijo ohranila. Tako v preiskanih vzorcih preseneča relativno majhna količina glinene velikostne frakcije in velika količina meljaste frakcije ter iz tega izhajajoče visoko razmerje melj/glina (Si/Cl), ki se giblje od 5,21 do 13,93, povprečno 9,13. Po literaturnih podatkih naj bi imela tla nastala iz netopnega ostanka apnenca to razmerje manjše od 0,2 (FRITPATRICK, 1971, v: MACLEOD, 1980). Podobno navaja tudi DURN (2003) vrednosti razmerja melj/glina 0,25 za netopne ostanke jurskih in krednih apnencev in dolomitov z območja Istre. Na osnovi tega sklepamo, da je velik del meljaste frakcije v preiskanih tleh alohton. Ta alohtoni material bi lahko izviral iz preperine mlajših kamnin, ki so ležale na zgornjetriasnih karbonatnih kamninah ali pa predstavlja material, ki je bil z eolskim, vodnim (rečnim) ali ledeniškim transportom prinesen iz drugih območij.

Raziskovano območje je v zgornjem triasu in juri paleogeografsko pripadalo Julijski karbonatni platformi (BUSER, 1989). Tako so bile na zgor-

vz.	Cl	Si	S	Si/Cl	Me	Md	SD	Sk	Cu
Be1	10,3	84,0	5,7	8,16	19,9	12,7	4,46	3,38	15,75
Be2	10,4	85,6	4,0	8,23	18,0	12,4	4,24	2,91	12,48
Be3	8,2	85,2	6,6	10,39	22,1	15,0	4,71	3,14	13,79
Be4	5,9	82,2	11,9	13,93	30,1	19,0	5,49	2,71	8,60
Go1_1	7,7	62,9	29,5	8,17	55,5	20,0	7,45	1,32	0,40
Go1_2	12,1	63,1	24,8	5,21	47,1	15,8	6,86	1,64	1,53
Me1	12,4	86,3	1,3	6,96	12,6	8,0	3,55	3,36	19,49
Po1	6,6	79,8	13,6	12,09	31,6	20,6	5,62	2,43	7,72
Je1	9,4	85,0	5,6	9,04	20,2	13,0	4,50	3,21	14,89
Me	9,2	79,3	11,4	9,13	28,6	15,2	5,21	2,68	11,78
Min	5,9	62,9	1,3	5,21	12,6	8,0	3,55	1,32	1,53
Max	12,4	86,3	29,5	13,93	55,5	20,6	7,45	3,38	19,49

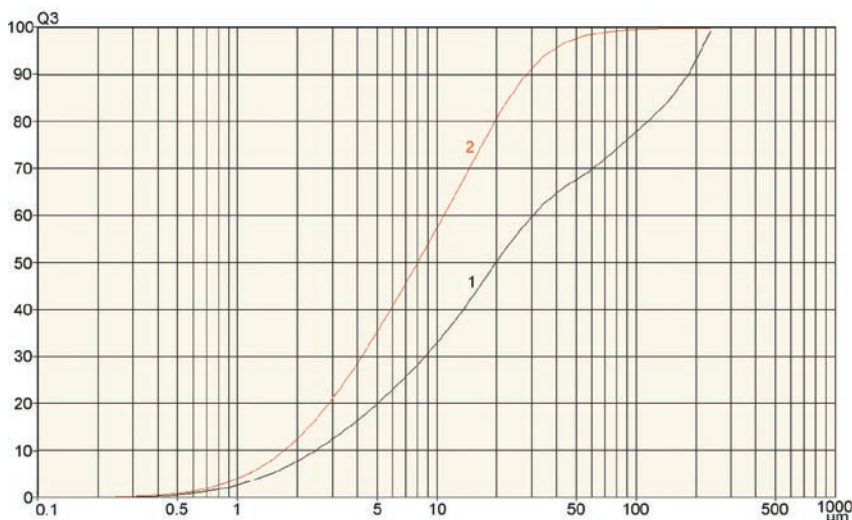
Tabela 3. Izbrani parametri analiz porazdelitve velikosti zrn manjših od 250 μm v tleh
Table 3. Selected parameters of analysis of grain size distribution (<250 μm) in soils

Cl – glina / clay (%), Si – melj / silt (%), S – pesek / sand (%), Me – srednja velikost / mean size (μm), Md – mediana / median (μm), SD – standardni odklon / standard deviation, Sk – asimetričnost / skewness, Cu – ošiljenost / kurtosis;
Me – srednja velikost analiziranih vzorcev / mean value of analysed samples, Min – minimalna velikost / minimum value, Max – maksimalna velikost / maximum value;



Sl. 6. Trikomponentni diagram z razmerji med peskom (S), meljem (Si) in glino (Cl) v anorganski komponenti tal velikostne frakcije pod 250 μm .

Fig. 6. Three-component diagram with the ratio between sand (S), silt (Si) and clay (Cl) in the inorganic component of soils in the grain size under 250 μm .



Sl. 7. Kumulativni krivulji porazdelitve velikosti zrn pod 250 μm : (2) najdrobneje zrnatem vzorcu Me1 in (1) najdebeleje zrnatem vzorcu Go1_1.

Fig. 7. Grain size cumulative curves of the grain size fraction under 250 μm : (2) the most fine grained sample Me1, and (1) the most coarse grained sample Go1_1.

njetriasne kamnine v spodnji juri odložile pretežno plitvovodne karbonatne kamnine. Zaradi zelo podobnih hidrodinamičnih pogojev nastanka zgornjetriasnih in spodnjejurskih karbonatnih kamnin, naj bi tudi njuna preperina, ki naj bi nastala iz netopnega ostanka apnencev, imela približno enako razmerje med meljem in glino, kot je podano zgoraj. Tako preperina spodnjejurskih apnencev ne bi mogla prispevati toliko meljaste komponente, da bi se to razmerje bistveno spremenilo. Poleg tega je območje zajela globoka erozija, ki je odstranila večino mlajšega (jurskega in krednega) kamninskega in morebitnega preperinskega materiala. Tako so se na zgornjetriasni karbonatni podlagi razvila slabo diferencirana, relativno mlada tla (rendzina in rjava polkarbonatna tla).

V kolikor alohtoni material ne izvira iz preperine zgoraj ležečih kamnin moramo njihov izvor iskati v prinosu le-tega iz drugih območij. Teoretično se je ta material lahko transportiral z vetrom, vodo ali ledom. Kljub temu, da je Bohinjski ledenik segel tudi na območje Pokljuke (MELIK, 1930; ŠIFRER, 1952) in odloži tudi tle, material katerih je predvsem lokalnega izvora z območja Julijskih

Alp. Savski in Dravski ledenik sta bila ločena z grebenom Južnih Karavank (VAN HUSEN, 1987). Tle Savskega ledenika sestavlja predvsem material sedimentnih prevladujoče karbonatnih kamnin in izvira iz zaledja Karnijskih in Julijskih Alp ter Karavank. Tili Dravskega ledenika, pa so imeli glavno zaledje materiala v metamorfni in magmatskih kamninah Centralnih Alp. Poleg tega moramo poudariti, da na vzorčenih mestih nismo nikjer zasledili ostankov tilov.

Strukturalnostnosti vzorcev tal analizirane mineralne velikostne frakcije manjše od 250 μm govore v prid eolskemu transportu alohtonega materiala tal. Podatki zrnatosti »tipične« puhlice, kot enega najbolj razprostranjenih eolskih

sedimentov, kažejo izrazit modus v območju velikosti 10 do 50 μm , z modalno velikostjo 30 μm (SMALLEY, 1995). Z modernejšimi merilnimi tehnikami so ugotovili, da sta v puhlici v območju meljaste frakcije izražena dva modusa/maksimuma in to pri 20 μm in pri 40 μm , kar da povprečje 30 μm (MACHALETT et al., 2008). Pogosto vsebuje puhlica tudi do 10 % drobnega peska, v primerih, ko le-ta presega 20 %, pa bi morali govoriti o peščeni puhlici. »Tipična« puhlica lahko vsebuje tudi do 20 % glinene velikostne frakcije (< 4 μm po Wentworthovi granulometrični razdelitvi) (PYE, 1987). Primerjava parametrov porazdelitve velikosti zrn manjših od 250 μm v raziskanih vzorcih tal (tabela 3, sl. 6) kaže precejšnje podobnost z navedenimi značilnostmi puhlice (DURN et al., 1999, 2003).

Mineralna sestava težke frakcije

Rezultati mineralne sestave težke frakcije v velikostni frakciji 63–125 μm so podani v tabeli 4. Tabela je razdeljena v tri polja. V prvem polju je podana količina težkih mineralov (TM) v masnih odstotkih v posameznem vzorcu. V drugem polju so podani številčni odstotki (odstotki izračunani na osnovi prešteti zrn) zastopanosti neprozornih mineralov (NE), klorita (ch) in biotita (bi) ter prosojnih težkih mineralov (PRO). V tretjem polju pa so podani številčni odstotki zastopanosti posameznih prosojnih težkih mineralov.

Raziskani vzorci tal vsebujejo povprečno 4,91 % težke frakcije (TM), najmanj 3,3 % jo je v vzorcu tal z Jelovice (Je1), največ 6,8 % pa v vzorcu s Pokljuke (Po1).

Neprozorni težki minerali (NE) pripadajo večinoma kovinskim mineralom, predvsem železovemu oksidu (hematitu) in deloma železovim hidroksidom (lepidokrokritu in göthitu) ter zelo

spremenjenim alumosilikatom. Zrna magnetita in pirita so zelo redko zastopana.

Razmerja med neprozornimi (NE) in prosojnimi (PRO) težkimi minerali so obrabo sorazmerno povezana. V preiskanih vzorcih tal je povprečna količina neprozornih težkih mineralov 34,1 %, prosojnih pa 57,9 %. Najmanj (19,1 %) neprozornih in največ (66,7 %) prosojnih težkih mineralov je v vzorcu tal z Belce (Be2), najmanj (40,3 %) prosojnih in največ (53,0 %) neprozornih težkih mineralov je v vzorcu tal z Jelovice (Je1).

Med filosilikati prevladuje klorit (ch) nad biotitom (bi). Klorita je povprečno 7,0 %, najmanj (1,8 %) ga je v vzorcu s Pokljuke (Po1), največ (15,3 %) pa v vzorcu z Belce (Be3). Biotita je povprečno 1,1 % ali skoraj 7-krat manj kot klorita, odsoten je v vzorcu tal z Belce (Be1), največ (3,0 %) pa ga je v vzorcu z Jelovice (Je1).

Pri zastopanosti posameznih prosojnih težkih mineralov lahko ločimo tri skupine:

1. minerali, ki nastopajo v vseh preiskanih vzorcih tal;
2. minerali, ki so prisotni v večini vzorcev;
3. minerali, ki so le v dveh ali enem preiskanem vzorcu.

Glede na relativno zastopanost posameznih mineralov lahko v mineralni združbi, ki nastopa v vseh vzorcih ločimo tri populacije mineralov:

1. populacijo sestavljajo minerali amfibolove in piroksenove skupine, ki v združbi presegajo povprečno količino 15 %;
2. populacijo sestavljajo minerali: skupine granatov, ziosit+klinoziosit in epidot, ki nastopajo v povprečnih količinah 8 do 10 %;
3. populacijo pa minerali: cirkon, rutil, turmalin, stavrolit in sfen, ki so zastopani v združbi s povprečnimi količinami od 1 do 3%.

Tabela 4. Mineralna sestava težke frakcije v velikostni frakciji 63–125 μm

Table 4. Composition of heavy minerals in the grain size fraction 63–125 μm

vz.	TM (m%)	NE	ch	bi	PRO	am	px	gr	zo_kzo	ep	zr	rt	tu	st	sh	cy	ap	chl	tz	br	sp	mz
Be1	5,3	39,8	3,5	0,0	56,7	37,5	9,1	18,3	9,1	9,1	4,9	3,0	1,8	3,0	3,0	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Be2	6,2	19,1	13,9	0,3	66,7	54,2	16,7	6,3	8,3	0,5	3,1	2,6	2,1	1,0	1,6	2,1	1,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0
Be3	5,5	26,5	15,3	2,2	56,0	45,0	15,5	11,7	5,8	7,1	1,9	2,6	2,6	1,9	0,5	0,6	1,3	1,9	0,0	0,5	0,0	0,0
Be4	3,9	23,2	9,9	0,7	66,2	52,8	17,0	7,7	4,1	4,6	3,1	2,1	4,6	1,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0	0,0
Go1_1	3,9	34,3	3,9	0,5	61,3	39,0	21,6	8,1	7,7	13,1	2,7	5,0	2,3	0,5	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Go1_2	4,9	37,2	8,8	1,6	52,4	44,5	21,4	3,9	8,4	9,0	3,2	2,6	1,3	1,9	0,1	0,6	2,6	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0
Po1	6,8	35,7	1,8	0,8	61,7	34,3	16,5	14,0	18,4	8,4	1,0	1,3	2,5	1,3	1,3	0,1	0,5	0,0	0,5	0,0	0,0	0,1
Je1	3,3	53,0	3,7	3,0	40,3	32,3	18,5	10,0	10,0	20,4	4,2	1,2	1,2	0,6	1,0	0,6	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Me1	4,4	37,7	2,0	0,6	60,1	50,0	10,6	8,7	6,8	9,7	1,9	4,4	2,4	1,5	1,5	1,5	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0
Me	4,9	34,1	7,0	1,1	57,9	43,3	16,3	9,8	8,7	9,1	2,9	2,7	2,3	1,5	1,1	0,7	0,8	0,3	0,1	0,2	0,1	0,0
Min	3,3	19,1	1,8	0,0	40,3	32,3	9,1	3,9	4,1	0,5	1,0	1,2	1,2	0,5	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Max	6,8	53,0	15,3	3,0	66,7	54,2	21,6	18,3	18,4	20,4	4,9	5,0	4,6	3,0	3,0	2,1	2,6	1,9	0,5	1,0	0,6	0,1
SD	1,1	10,1	5,2	1,0	8,1	8,0	4,2	4,3	4,0	5,5	1,2	1,3	1,0	0,7	0,9	0,7	0,8	0,6	0,2	0,3	0,2	0,0

vz. – vzorec / sample; TM (m%) – utežni % težkih mineralov / mass % of heavy minerals; NE – neprozorni težki minerali (številčni % (No%)) / opaque heavy minerals (number % (No%)); ch – klorit / chlorite (No%); bi – biotit / biotite (No%); PRO – prosojni težki minerali / transparent heavy minerals (No%); am – amfiboli / amphiboles (No%); px – pirokseni; gr – granati (No%); zo_kzo – zoisit+klinoziosit / zoisite+clinoziosite (No%); ep – epidot / epidote (No%); zr – cirkon / zircon (No%); rt – rutil / rutile (No%); tu – turmalin / turmaline (No%); st – stavrolit / staurolite (No%); sh – sfen / sphen (No%); cy – disten / kyanite (No%); ap – apatit / apatite (No%); chl – kloritoid / chloritoid (No%); tz – topaz / topaz (No%); br – brookit / brookite (No%); sp – spinel / spinel (No%); mz – monazit / monazite (No%); Me – srednja vrednost / mean value; Min – minimalna vrednost / minimum value; Max – maksimalna vrednost / maximum value; SD – standardni odklon / standard deviation;

Med minerali, ki so prisotni v večini vzorcev so: disten, apatit in koritoid ter so zastopani s povprečnimi količinami 0,3 do 0,8 %. Minerali: topaz, brookit, spinel in monazit, so prisotni le v dveh ali enem preiskanim vzorcu, pa so prisotni s povprečnimi količinami manj kot 0,2 %.

Amfiboli (*am*) so najbolj zastopani med prosojnimi težkimi minerali. Med njimi prevladujejo različni rogovačne vrste, v manjši količini se pojavljajo tudi tremolit in različni iz vrste feroaktinolit-aktinolit. Amfiboli izvirajo večinoma iz metamorfnih kamnin. V preiskanih vzorcih je povprečno količina amfibolov 43,3 %, najmanj (32,2 %) jih je v vzorcu z Jelovice (Je1), največ (54,2 %) pa v vzorcu z območja Belce (Be2).

Pirokseni (*px*) so sorazmerno sveži. Med njimi smo mestoma prepoznali tudi hipersten, ki naj bi, kot tudi večina piroksenov, izviral iz magmatskih kamnin. Povprečna količina piroksenov je 16,3 %, najmanj (9,1 %) jih je v vzorcu z območja Belce (Be1), največ (21,6 %) pa v vzorcu z Golice (Go1_1).

Granati (*gr*) so sorazmerno sveži in malo korodirani. Povprečno so zastopani z 9,8 %, najmanj (3,9 %) jih je v vzorcu z Golice (Go1_2) in največ (18,3 %) v vzorcu z območja Belce (Be1).

Zoisit+klinozoisit (*zo_kzo*) nastopata v oglatih do dobro zaobljenih zrnih. Nekatera večja zrna imajo značilne anomalne interferenčne barve. Povprečna zastopanost zoisita+klinozoisita v vzorcih preiskanih tal je 8,7 %, najmanj (4,1 %) ju vsebuje vzorec Be4, največ (18,4 %) pa vzorec Be1, oba z območja Belce.

Epidot (*ep*) je prisoten s povprečno količino 9,1 %. Najmanj (0,5 %) ga je v vzorcu Be2 z območja Belce, največ (20,4 %) pa v vzorcu Je1 z Jelovice. Nekatera zrna epidota so sveža, druga pa nekoliko spremenjena.

Cirkon (*zr*) nastopa v zrnih različnih oblik. Nekatera zrna so euhedralna s prizmatskim habitusom, druga pa so zelo dobro zaobljena. Med tema skrajnima oblikama nastopajo zrna cirkona z vmesnimi stopnjami zaobljenosti. V preiskanih vzorcih ni mogoče zaslediti grupacije posameznih oblik cirkona, ampak so naključno porazdeljeni v vseh vzorcih. Površina nekaterih zelo dobro zaobljenih sferičnih zrn je abradirana, na njej pa so opazni drobne trikotne vdolbinice. Povprečna količina cirkona je 2,9 %, medtem ko ga je najmanj (1,0 %) v vzorcu Po1 s Pokljuke, največ (4,9 %) pa v vzorcu Be1 z območja Belce.

Rutil (*rt*) se pojavlja v nepravilnih zrnih in ga je povprečno 2,7 %, najmanj (1,2 %) v vzorcu Je1 z Jelovice, največ (5,0 %) pa v vzorcu Go1_1 z Golice.

Turmalin (*tu*) je v preiskanih vzorcih tal prisoten povprečno s 2,3 %, najmanj (1,2 %) ga je v

vzorcu Je1 z Jelovice, največ (4,6 %) pa v vzorcu Be4 z območja Belce. V populaciji zrn turmalina prevladujejo rjavkasti različki, le v vzorcu Je1 z Jelovice se pojavljajo tudi rožnati različki turmalina – rubellita.

Stavrolit (*st*) se pojavlja v različnih, nepravilnih oblikah in ga je povprečno 1,5 %, najmanj (0,5 %) ga je v vzorcu Go1_1 z Golice, največ (3,0 %) pa v vzorcu Be1 z območja Belce.

Poleg opisanih težkih mineralov se pojavljajo v majhnih količinah in ne v vseh vzorcih tudi: sfen (*sh*), disten (*cy*), apatit (*ap*), koritoid (*chl*), topaz (*tz*), brookit (*br*), spinel (*sp*) in monazit (*mz*), ki pa jih glede na majhno zastopanost ne bomo posebej opisovali.

Interpretacija

Mineralna sestava težke frakcije nakazuje pretežno metamorfno-magmatsko izvorno območje. Glede na prevladovanje metamorfne združbe težkih mineralov nad magmatsko sklepamo, da je bil na izvornem območju obseg razgaljenih metamorfnih kamnin večji kot magmatskih. S tako sestavo izvornega območja je nam najbližje severno v Avstriji ležeča cona Centralnih Alp z Austroalpinsko in s Penninsko enoto, predvsem kristalinski kompleks, ki ga grade orto- in paragnajsi, blestniki, kremenovi filiti in amfiboliti.

Mineralna sestava lahke frakcije

Rezultati mineralne sestave lahke frakcije v velikostni frakciji 63–125 μm so podani v tabeli 5. V tabeli so kot ocene relativne zastopanosti posameznih mineralov podane vrednosti relativnih jakosti, ki so jih v difraktogramih prispevali posamezni minerali: kremen (*qu*), albit (*ab*), K-glinenci (*Kf* – mikroklin in/ali ortoklaz), muskovit (*mu*) in klorit (*ch*). Kot je razvidno se klorit pojavlja tako v težki kot v lahki frakciji. To je posledica zelo spremenljive sestave kloritov, pri čemer na njihovo gostoto, ki se spreminja v širokih mejah (2,6 do 3,3 g/cm^3 pa tudi več) vpliva predvsem razmerje med magnezijem in železom. Čim več železa vsebuje klorit tem večjo gostoto ima. Poleg naštetih mineralov smo v lahki frakciji v nekaterih vzorcih določili tudi nekaj paragonita, količino katerega smo prišteli k muskovitu. Z rentgensko analizo smo ugotovili, da ločitev lahke in težke mineralne frakcije z bromoformom ni bila popolna. V lahki mineralni frakciji smo zasledili manjše količine (do 3 %) železovih hidroksidov (göthita in/ali lepidokrokita) in/ali oksidov (hematita), ter v sledovih tudi druge težke minerale, predvsem amfibole in piroksene. Relativne količine (intenzitete) naštetih težkih mineralov in možnih drugih nedoločenih mineralnih faz, ki ne dosega 1 % vseh intenzitet difraktograma, so podane kot razlika do 100 %, ki je navedena v koloni Λ in znaša od 1,7 do 5,7 %, povprečno 3,7 %.

Tabela 5. Relativne intenzitete mineralov v difraktogramih lahke mineralne frakcije v velikostni frakciji 63–125 µm

Table 5. Relative intensities in X-ray diffraction patterns of light minerals in the grain size fraction 63–125 µm

<i>vz.</i>	<i>Qu</i>	<i>ab</i>	<i>Kf</i>	<i>mu</i>	<i>ch</i>	Λ
Be1	59,0	11,3	0,0	14,5	13,2	2,0
Be2	36,1	9,1	2,0	33,1	15,1	4,6
Be3	52,8	8,3	1,4	20,0	11,8	5,7
Be4	54,1	8,0	1,7	17,6	14,0	4,6
Go1_1	69,6	10,2	0,8	11,9	5,8	1,7
Go1_2	58,8	9,6	0,0	17,8	11,0	2,8
Me1	58,3	13,6	1,5	11,8	11,6	3,2
Je1	68,0	8,1	1,8	10,4	8,9	2,8
Po1	66,6	8,2	0,0	8,2	11,3	5,7
Me	58,1	9,6	1,0	16,1	11,4	3,7
Min	36,1	8,0	0,0	8,2	5,8	1,7
Max	69,6	13,6	2,0	33,1	15,1	5,7

qu – kremen / quartz (%), *ab* – albit / albite (%), *Kf* – kalijev glinenci / K – feldspars (%), *mu* – muskovit / muscovite (%), *ch* – klorit / chlorite (%), Λ – težki minerali in nedoločene mineralne faze / heavy minerals and indefinite mineral phases (%);

Me – srednja vrednost / mean value, Min – minimalna vrednost / minimum value, Max – maksimalna vrednost / maximum value;

Kremen (*qu*) je glede na relativno intenziteto najbolj zastopan mineral v lahki mineralni frakciji. Povprečna relativna intenziteta je v analiziranih vzorcih 58,1 %, najmanjša (36,1 %) v vzorcu Be2 z območja Belce, največja (69,6 %) pa v vzorcu Go1_1, ki vsebuje tudi največ peščene velikostne frakcije.

Albit (*ab*) je prisoten s povprečno relativno intenziteto 9,6 %, najmanjšo (8,0 %) ima v vzorcu Be4 z območja Belce, največjo (13,6 %) pa v vzorcu Me1 z Mežakle.

K-glinenci (*Kf*), med katerimi nastopata mikroklin in ortoklaz, od katerih slednji rahlo prevladuje, so v lahki mineralni frakciji s povprečno relativno intenziteto 1,0 % najmanj zastopani. Njihova intenziteta pa je tudi najbolj variabilna. Kar v treh vzorcih jih nismo zaznali, največja intenziteta (2,0 %) pa je v vzorcu Be2 z območja Belce.

Med filosilikati muskovit (*mu*) prevladuje nad kloritom. Povprečno je prispevek njegove relativne intenzitete 16,1 %, najmanjša (8,2 %) je v vzorcu Po1 s Pokljuke, največja (33,1 %) pa v vzorcu Be2 z območja Belce, v katerem se pojavlja najmanjša količina kremenca.

Klorit (*ch*) je zastopan povprečno s 11,4 % in le v enem vzorcu Po1 s Pokljuke presega intenziteto muskovita. Najmanjša kloritova intenziteta (5,8 %) je v vzorcu Go1_1 z Golice, največja (15,1 %) pa v vzorcu Be2 z območja Belce.

Ker je primerjava parametrov porazdelitve velikosti zrn manjših od 250 µm v raziskanih vzorcih tal pokazala precejšno podobnost z značilnostmi »tipične« puhlice pogledimo še njeno mineralno sestavo: kremen 50 do 70 %, glinenci 5 do 30 %, sljude 5 do 10 %, karbonati 0 do 30 %, glineni mi-

nerali 10 do 15 % (Pye, 1987). Glede na to, da smo v vzorcih tal analizirali le lahko mineralno frakcijo velikosti od 63 do 125 µm, in da so kot kvantitativna ocena mineralne sestave podane relativne intenzitete posameznih mineralov (tabela 5), direktna primerjava navedenih kvantitativnih podatkov ni smiselna, predvsem za karbonate in glinaste minerale, ki jih v analizirani frakciji ni.

Struktura površine kremenovih zrn

Površino kremenovih zrn, so pred odkritjem elektronskega mikroskopa in pred širšo uporabo vrstičnega elektronskega mikroskopa (SEM), s katerim je omogočeno neposredno opazovanje površine predmetov – mineralnih zrn, opazovali pod binokularnim in polarizacijskim mikroskopom. Opazili so, da nekatera kremenova zrna niso abradirana in prosojna, druga zglajena in prosojna, tretja pa motna. CAILLEUX (1952) in ZIMDARS (1958) sta med prvimi poskušala uporabiti strukturo površine za interpretacijo sedimentacijskega okolja oziroma prevladujočega transportnega medija. Ugotovila sta, da so motna zrna bolj pogosta v okoljih s prevladujočim eolskim transportom, medtem ko so zglajena in prosojna zrna pogostejša v okoljih z vodnim transportom. Poleg tega so ugotovili, da je razmerje med zglajenimi in prosojnimi ter motnimi zrni odvisno tudi od velikosti zrn. Količina motnih zrn se manjša z zmanjševanjem velikosti opazovanih zrn tudi znotraj enakega sedimentacijskega okolja.

Po letu 1960 se je uporaba SEM pri proučevanju površine kremenovih zrn za interpretacije izvora, načina transporta, sedimentacijskega okolja in diagenetskega razvoja kamnin zelo povečala (KRINSLEY & TAKAHASHI, 1962; KRINSLEY & DONAHUE, 1968; KRINSLEY & DOORNKAMP, 1973; MARGOLIS & KRINSLEY, 1974; AL-SALEH & KHALAF, 1982; CULVER et al., 1983; CARTER, 1984; in drugi). S SEM so odkrivali nove strukture površine, ki jih je bilo potrebno opisati in poimenovati. Za njihovo uspešno uporabo pri interpretaciji sedimentacijskega okolja, pa je potrebno prepoznati mehanizme, s katerimi posamezne strukture površine nastajajo. Izkazalo se je, da številne podobne strukture površine nastopajo v različnih sedimentacijskih okoljih, vendar je njihova zastopanost različna od okolja do okolja. HIGGS (1979) je podal definicije in izvor originalnih opisov 30 struktur površine in jih povezal s sedimentacijskimi okolji. Poleg tega, se je izkazalo, da so strukture površinske kremenovih zrn odvisne tudi od drugih parametrov, kot so: velikost preiskovanih zrn, čas izpostavljenosti delovanju transportnega medija, delež prinosa materiala in hitrost sedimentacije, kar vse otežuje interpretacijo.

Pri pregledu izbranih zrn velikosti 63 do 125 µm s SEM/EDS smo ugotovili, da nismo izbrali le kremenovih zrn, ampak tudi glinenčeva. Med kremenovimi zrni prevladujejo oglata zrna s školjkastimi prelomnimi ploskvami (Tab. 1 A, B, C, D), zelo, zelo redka pa so zaobljena zrna (Tab. 1 E, F). Poleg tega smo s SEM razkrili, da pripadajo

pod binokularnim mikroskopom motna zrna trem skupinam zrn: a) polikristalnim zrnom s pogosto bimodalno porazdelitvijo zrn (Tab. 2 A, B), b) kremenju z vidnimi strukturami rasti, s površino pokrito z začetnimi drobnimi kristalčki, ki nakazujejo rast ploskve v smeri njihove orientacije (Tab. 2 C, D, E, F) in/ali vsebuje številne pore v kristalih (Tab. 3 A, B) in c) zrnem glinencev z močnejše izraženimi strukturami kemičnega raztapljanja (Tab. 3 C, D, E). Na prevladujočih oglatih kremenovih zrnih so med vsemi strukturami površine najbolj zastopane školjkaste (Tab. 1 A, B, C, D) in nekoliko redkeje ravne prelomne ploskve. Na školjkastih prelomnih ploskvah so pogosto razvite ravne in ukrivljene stopničke (Tab. 1 A, B, C, D; Tab. 3 F; Tab. 4 A, B). Na teh prelomnih ploskvah so tudi mlajše mehansko nastale strukture: ravne in ukrivljene praske in ponekod razpoke (Tab. 4 C, D) ter nepravilne in V oblikovane vdolbine (Tab. 1 C; Tab. 4 A, B, C), ki so nastale zaradi trkov med zrnji. Nekatere orientirane V oblikovane vdolbine pa so posledica kemičnega raztapljanja – jedkanja kremenja (Tab. 4 D). Na zaobljenih kremenovih zrnih (Tab. 1 E, F) so vidne nepravilne vdolbine raztapljanja (Tab. 4 E, F) in ponekod tudi strukture izločanja kremenja (Tab. 4 F).

Interpretacija

Monokristalnim kremenovim zrnom ne moremo nedvoumno opredeliti njihovega izvora. Lahko izvirajo iz magmatskih ali metamorfnih kamnin, redkeje klastičnih sedimentnih kamnin. Polikristalnim kremenovim zrnom z bimodalno porazdelitvijo velikosti zrn (Tab. 2 A, B) pripisujemo metamorfno poreklo. Kremenovim zrnom z vidnimi strukturami rasti, začetnimi drobnimi kristalčki na kristalnih ploskvah, ki nakazujejo rast ploskve v smeri njihove orientacije (Tab. 2 C, D, E, F) in/ali vsebujejo številne pore v kristalih (Tab. 3 A, B) pa pripisujemo žilni – hidrotermalni izvor.

Večina opazovanih struktur površine na oglatih kremenovih zrn kaže, da so te nastale z lomi zrn, ki jih povezujemo predvsem z ledeniško abrazijo. Robovi školjčnih in ravnih prelomnih ploskev so večinoma ostri (Tab. 1 A, B, C, D), redkeje nekoliko zaobljeni. Na prelomnih ploskvah nastopajo mlajše, pretežno mehansko nastale strukture površine: ravne in ukrivljene praske ter nepravilne in V oblikovane vdolbine (Tab. 1 C, D; Tab. 4 A, B, C, D), ki so nastale s trki med zrnji. V oblikovane vdolbine naj bi nastale v vodnem, rečnem okolju. Zelo redka zaobljena zrna (Tab. 1 E, F) pa najverjetneje izvirajo iz okolij, v katerih je prevladoval eolski transport. Ker so zrna majhna na njihovi površini niso izražene navzgor obrnjene ploskve (upturned plates) kot posledica trkov poskakajočih zrn. Vendar pa so se zrnca zaradi abrazije zaoblila. K njihovi zaobljenosti pa so lahko prispevali tudi procesi delnega raztapljanja in izločanja kremenja (Tab. 4 F) (KRINSLEY & DOORNKAMP, 1973).

Strukture raztapljanja so izrazite predvsem na glinenčevih zrnih (Tab. 3 C, D, E), veliko manj izražene pa so na površini kremenovih zrn (Tab. 1 E,

F; Tab. 4 D, E, F). Pri tem je potrebno poudariti, da se te nahajajo predvsem na posameznih zaobljenih zrnih, medtem ko so na oglatih kremenovih zrnih redke (Tab. 4 D). Strukture raztapljanja glinenčevih zrn označujemo kot »mlade« in naj bi nastale v procesih pedogeneze. V vzorčeni preperi in tleh tipa rendzine in rjavih polkarbonatnih tal naj bi bilo geokemično okolje pedogeneze večinoma nevtralnega do rahlo alkalnega ali rahlo kislega. Predvsem v nekoliko debelejših talnih profilih, pri katerih naj bi imel določen vpliv tudi eolski material, je lahko reakcija tudi kisla pH 5–6 (ČIRIČ, 1984). Glede na izrazitost struktur raztapljanja glinenčevih zrn sklepamo, da so te nastale v nekoliko kislem geokemičnem okolju. Ker je topnost kremenice v takem geokemičnem okolju majhna, pripisujemo večino struktur raztapljanja na površini kremenovih zrn podedovani strukturi iz prvotnih okolij, predvsem onih, v katerih je prevladoval eolski transport.

Razprava in zaključki

Na preperevanje in nastanek tal – pedogenezo vplivajo številni dejavniki, ki jih lahko povežemo v pet neodvisnih in delno odvisnih faktorjev: matična kamnina, klima, čas, relief in organizmi. Osnovni parametri navedenih faktorjev, predvsem klime, reliefa, organizmov – vegetacije in matične kamnine so podani v tabelah 1 in 2 ter pri opisu geografskih značilnosti vzorčevalnega območja. V raziskanih lastnostih (zrnavosti, mineralni sestavi težke in lahke frakcije ter pri strukturi površin kremenovih zrn določenih velikostnih frakcij vzorčenih tal) nismo zasledili med vzorci večjih razlik, ki bi jih lahko povezali z vplivom razlik v klimi, reliefu in organizmih. To razlagamo s premajhnimi razlikami med temi faktorji na vzorčenem območju. Zato o njihovem vplivu na preperevanje in nastanek tal ne bomo podrobneje razpravljali. Glede na postavljeno hipotezo bomo več pozornosti posvetili matični kamnini in času.

Pri relativno majhni variabilnosti klime, reliefa in organizmov ima na produkte preperevanja in na lastnosti tal v začetku največji vpliv matična kamnina. Vpliv razlik v matični kamnini se s podaljševanjem časa preperevanja (predvsem kemičnega) in pedogeneze zmanjšuje in se, v nekaterih primerih, po dovolj dolgem času, vpliv matične kamnine lahko celo zabiše.

Čas nastajanja tal lahko absolutno določimo z izotopskimi, luminiscenčnimi in paleomagnetnimi metodami, ki pa jih nismo uporabili. Zato bomo podali relativni čas nastanka tal, katerega smo opredelili predvsem s stopnjo razvitosti tal in poznavanjem stratigrafije ter časovnega razvoja pomembnih geoloških dogodkov.

Na raziskovanem območju so tla relativno slabo razvita, saj pripadajo večinoma rendzini ali rjavim polkarbonatnim tlem in jih lahko opredelimo kot mlada tla. Glede na sorazmerno visoko lego (med 960 in 1735 m) so tla lahko pričela nastajati šele po umiku stalnega pokrova snega in ledu, ki je v zadnji, würmski ledeni dobi prekrival tudi ob-

ravnvano območje (VAN HUSEN, 1987). To se pravi, da so obravnavana tla holocenska, mlajša od približno 11.000 let.

Kot je bilo že omenjeno so lastnosti preperine in tal v prvi fazi odvisne predvsem od značilnosti matične kamnine, saj naj bi ta prispevala glavno mineralno komponente tal. Pri preperevanju je matična kamnina podvržena fizikalnim in kemičnim procesom, ki potekajo z roko v roki. Fizikalni procesi preperevanja prispevajo v tla, z naraščanjem njihove intenzivnosti in časa, postopno manjše drobce matične kamnine in primarne, kemično nespremenjene minerale matične kamnine, kemični procesi pa spreminjajo primarne minerale v sekundarne ali pa povzročajo nastanek novih, avtigenih mineralov. Kateri procesi preperevanja so v dani situaciji intenzivnejši oziroma kakšno je razmerje med primarnimi in spremenjenimi (sekundarnimi) ter avtigenimi minerali, je pri določenih matični kamnini odvisno od štirih, zgoraj navedenih faktorjev: klime, časa, reliefa in organizmov.

Karbonatne kamnine sestavljata predvsem dva bistvena minerala: kalcit in dolomit. Njuna količina se v karbonatnih kamninah lahko spreminja od 50 do preko 99,9 %, preostanek pa lahko sestavljajo drugi, predvsem nekarbonatni minerali. Pod vplivom deževnice in površinske vode obogatene z raztopljenim CO₂ in različnimi organskimi kislinami se karbonatni in drugi lažje topni nekarbonatni minerali raztapljajo, medtem ko so preostali nekarbonatni minerali večinoma pod temi pogoji netopni in tvorijo netopni ostanek. Ta pa v končni fazi sestavlja anorgansko, mineralno komponento tal. V statičnih pogojih, brez vpliva erozije in prinosa alohtonega materiala, je debelina tal nad matično kamnino odvisna od količine nekarbonatnih mineralnih primesi (netopnega ostanka) v karbonatni kamnini in hitrosti raztapljanja, korozije karbonatnih kamnin oziroma časa, kateremu je karbonatna kamnina izpostavljena kemičnemu preperevanju, raztapljanju.

Ker sami nismo določali količine netopnega ostanka v matičnih karbonatnih kamninah na raziskovanem območju, povzemamo nekaj literaturnih podatkov o količinah netopnih ostankov nekaterih karbonatnih kamnin v Sloveniji. Srednjetroasni wettersteinski apnenci z območja Pece in Uršlje gore imajo od 0,1 do 0,9 %, povprečno 0,4 % netopnega ostanka (HOČEVAR, 1995); zgornjetriasni apnenci jugozahodne Slovenije imajo od 1,5 % netopnega ostanka (OGORELEC, 1988); zgornjetriasni glavni dolomit vsebuje od 0,8 do 4,5 %, stromatolitni deli pa od 1,2 do 1,3 % netopnega ostanka (OGORELEC & ROTHE, 1993); kredni apnenci na območju Kočevske vsebujejo od 1 do 9 %, povprečno 5 % netopnega ostanka (PLENIČAR & DOZET, 1994); večina apnencev na območju Krasa ima od 1 do 2 % netopnega ostanka (GAMS, 1974); ZUPAN-HAJNA (2003) navaja za apnence istega območja količine od 0,3 do 6,3 % netopnega ostanka; apnenci in dolomiti Istre vsebujejo od 0,08 do 2,23 %, povprečno 0,4 % netopnega ostanka (DURN et al., 1999, DURN, 2003).

Hitrosti raztapljanja karbonatov oziroma njihovo korozijo, v pogojih relevantnih za Slovenijo,

so ocenjevali z različnimi metodami: meritvami koncentracije karbonatov v rekah in njihovih pritokih (GAMS, 1962), merjenjem površinske korozije s pomočjo standardnih tablet (GAMS, 1985) in z direktnimi mikrometrskimi meritvami (CUCCHI et al., 1997). Te različne metode dajo tudi nekoliko različne rezultate. Ocena hitrosti korozije izražena s časom potrebnim za zmanjšanje debeline (raztapljanje) 1 m karbonatnih kamnin znaša v porečju Ljubljance 16.600 let, Soče 12.000 let in Krke 17.200 let (GAMS, 1962) oziroma 60 μm/leto, 83 μm/leto in 58 μm/leto. V Alpskem pasu Slovenije je ocenjena hitrost korozije s pomočjo standardnih tablet v območju od 1,7 do 14,7 μm/leto (GAMS, 1985). Direktno mikrometrsko meritve na območju Krasa pa so dale hitrost korozije okoli 20 μm/leto (CUCCHI et al., 1997). Tako bi bilo pri hitrosti korozije 20–60 μm/leto karbonatne matične kamnine s povprečno količino 1,5 % netopnega ostanka za nastanek 1 cm nekarbontene preperine oz. tal potrebno približno 11.000 do 33.000 let. Tako bi v času holocena, pri večji hitrosti korozije-raztapljanja (60 μm/leto), avtohtono lahko nastalo le 1 cm nekarbontene preperine oz. tal. Glede na bistveno večjo debelino tal na določenih območjih vzorčenega ozemlja moramo iskati poleg avtohtonega tudi alohtoni izvor nekarbonatnega materiala tal.

Alohtoni vpliv v sestavi tal na wettersteinskih apnencih na območju Mežice (Peca in Uršlja gora) je zaznala že HOČEVARJEVA (1995), ki je poleg strukturnih (granulometričnih) in mineraloških analiz opravila tudi kompleksnejše geokemične analize tal in netopnih ostankov apnencev. Predpostavila je eolski transport pretežno meljastega materiala z območja Alp in izključila hipotezo o afriškem, saharškem poreklu tega materiala.

Na karbonatnih kamninah nastajajo v mediteranski klimi tudi rdeča tla imenovana terra rossa. Številni raziskovalci izpostavljajo večji ali manjši vpliv alohtonega materiala na njen nastanek (LIPPI-BONCAMPI et al., 1955; BALAGH & RUNGE, 1970; YAALON & GANOR, 1973; ŠINKOVEC, 1974; MACLEOD, 1980; OLSON et al., 1980; JACKSON et al., 1982; DANIN et al., 1983; RAPP, 1984; YAALON, 1997; DURN et al., 1999, 2003; DURN, 2003). V nadaljevanju se bomo dotaknili le vplivu alohtonega materiala na nastanek terra rosse v Istri (DURN & ALJINOVIĆ, 1995; DURN et al., 1999, 2003; DURN, 2003). S strukturnimi, granulometričnimi, mineraloški in geokemičnimi analizami so v sestavi terra rosse poleg avtohtonega netopnega ostanka karbonatov dokazali tudi alohtoni, eolski doprinos materiala. Od zgodnjega srednjega pleistocena je bil v severni in centralni Italiji velik, na Dalmatinskih otokih in v Istri pa znaten vpliv sedimentacije puhlice (CREMASCHI, 1990). V severozahodnem delu Istre, na Savudrijskem rtu prekriva zgornje pleistocenska puhlica terra rossa, razvito na delno dolomitiziranim zgornjekrednem apnencu. Sledove puhlice pa je možno najti tudi v terra rossi, v predelih, kjer leta ne tvori samostojnih plasti. Po podatkih YAALONA (1997) pride pri hitrosti sedimentacije eolskega materiala nad 40 μm/leto do nastajanja puhlice, v primerih, ko je hitrost sedimentacije manjša od

20 μm /leto, pa naj bi se eolski material popolnoma asimiliriral v drugih sedimentih ali preperini talnega profila. Na osnovi primerjave mineralne sestave težke frakcije pleistocenskih sedimentov reke Pad, puhlice in terra rosse, v kateri prevladujejo minerali epidotno-zoisitne in amfiboske skupine, so ugotovili, da eolski material puhlice in alohtoni material terra rosse izvirata iz pleistocenskih sedimentov poplavne ravnine reke Pad, ki se je v pleistocenu zaradi znižanja morske gladine raztezala tudi na severen del Jadrana (DURN & ALJINOVIC, 1995; DURN et al., 1999, 2003; DURN, 2003). Poleg eolskega materiala je lahko v sestavi terra rosse v Istri ponekod prisotna tudi preperina fliša. Tako je DURN s sodelavci (1999, 2003) opredelil istrsko terra rosso kot poligenetska reliktna tla in ponekod kot pedo-sedimentni kolvuviani kompleks.

Zgoraj navedeni literaturni podatki in podani analitski podatki o zrnivosti, mineralni sestavi težke in lahke frakcije ter o strukturi površin kremenovih zrn določenih velikostnih frakcij, vzorčenih tal na območju Zahodnih Karavank in visokih planot Julskih Alp ter njihove interpretacije potrjujejo našo hipotezo:

Mineralna komponenta tal na zgornjetriasnih apnencih v Karavankah na območju Golice in Struške (Belske planine) ne predstavlja le avtohtonega materiala, netopnega ostanka preperevanja matičnih apnencev, ampak tudi alohtoni, verjetno eolski material.

Na alohtoni material v tleh lahko sklepamo na osnovi homogenosti sestave težkih mineralov v tleh razvitih na različnih matičnih karbonatnih kamninah (dachsteinskem apnencu, karnijskem apnencu z roženci, cordevolskem dolomitu). Kajti verjetnost, da bi imeli netopni ostanki različnih matičnih karbonatnih kamninah, ki tvorijo avtohtono komponento tal, enako mineralno sestavo (združbo težkih mineralov), je zelo majhna. Poleg tega pa je hitrost raztapljanja apnenca premajhna, da bi v času holocena, v približno 11.000 letih, lahko nastala tako debela tla, kot jih opazujemo ponekod na območju Zahodnih Karavank (Belca, Golica). Zato mora biti v sestavi nekarbonatne komponente tal poleg avtohtonega materiala prisoten tudi alohtoni material.

Strukturne značilnosti:

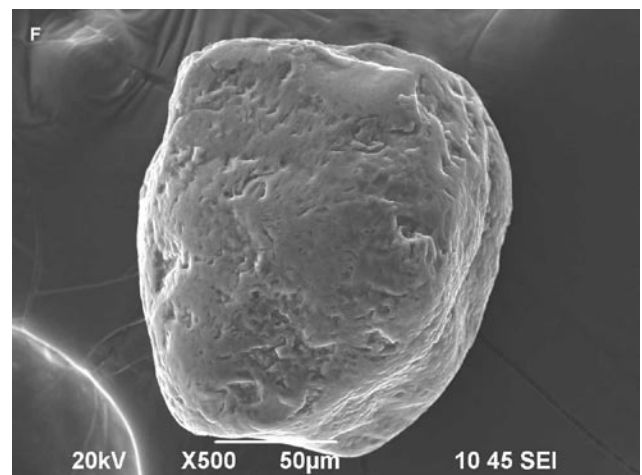
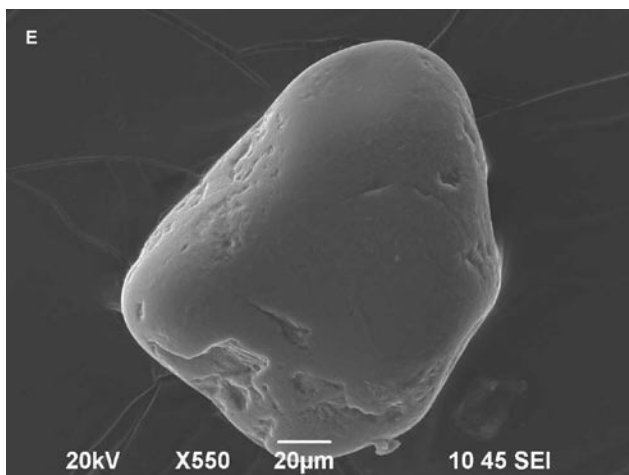
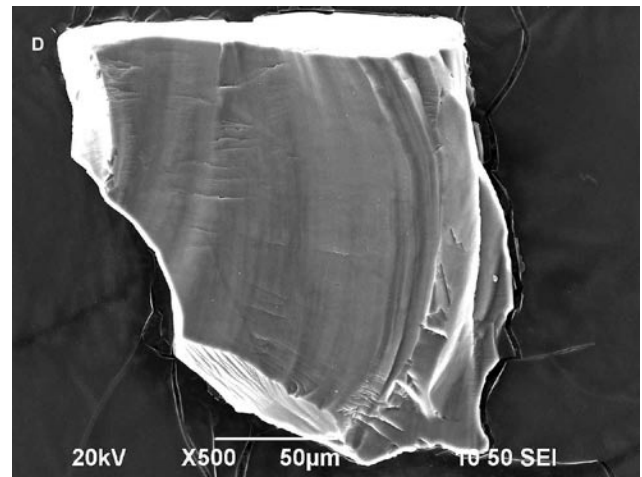
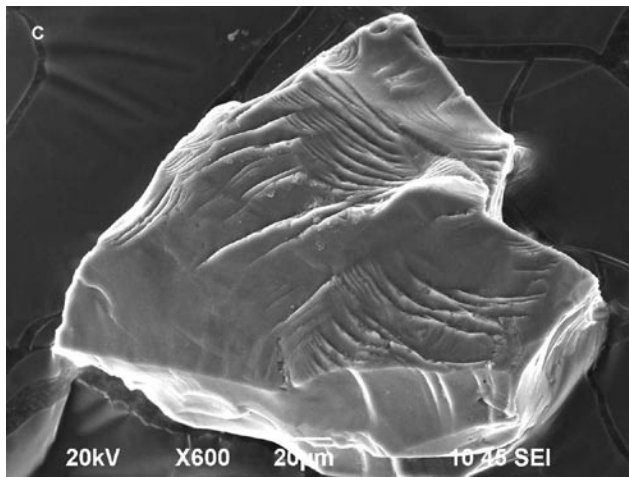
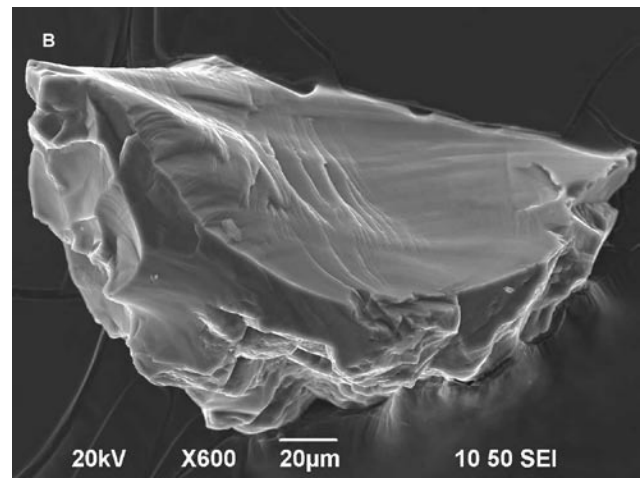
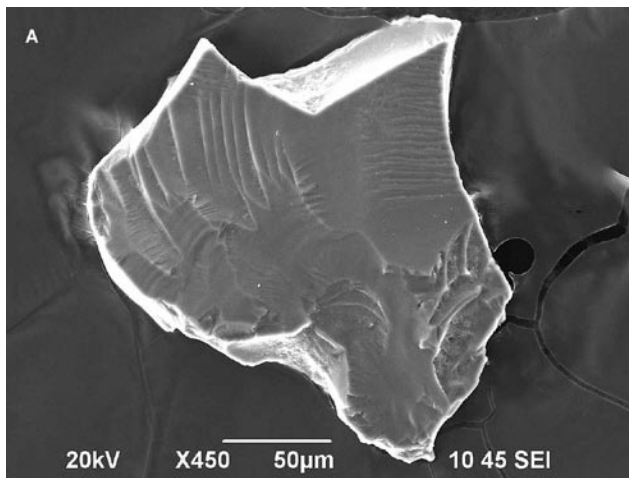
- a) visoko razmerje melj/glina (povprečno 9,13), v primerjavi z nizkim razmerjem melj/glina v netopnih ostankih apnencev (okoli 0,2 (FRITPATRICK, 1971, v: MACLEOD, 1980) oziroma 2,5 (DURN, 2003));
- b) podobnost povprečne velikosti 28,6 μm in modalne velikosti 15,2 μm , v primerjavi z modalno velikostjo v območju 10 do 50 μm , s povprečjem 30 μm v »tipični« puhlici (SMALLEY, 1995)

nekarbonatne komponente tal, kažejo na eolski transport alohtonega materiala.

Tabla 1 – Plate 1

- A Oglato kremenovo zrno s školjkastimi prelomnimi ploskvami, na katerih so vidne ravne in upognjene stopničke (Be3).
Conchoidal fracture surfaces with straight and arcuate steps on angular quartz grain (Be3).
- B Školjkaste prelomne ploskve z upognjenimi stopničkami na oglatem kremenovem zrnu z ostrim grebenom (zgoraj), ki ga oblikujeta sekajoči se školjkasti prelomni ploskvi (Be4).
Conchoidal fracture surfaces, with arcuate steps and sharp ridges (upper part) that is formed by intersection of two conchoidal fracture surface on angular quartz grain (Be3).
- C Oglato kremenovo zrno s školjkastimi prelomnimi ploskvami, na katerih so vidne ravne in upognjene stopničke. Na njih se pojavljajo mehanske nepravilne in V oblikovane vdolbine (Be3).
Conchoidal fracture surfaces with straight and arcuate steps, on which are in places mechanical small irregular and V-form pits on angular quartz grain (Be3).
- D Oglato kremenovo zrno s školjkastimi prelomnimi ploskvami, na katerih so vidne ravne in upognjene stopničke. Na desni spodnji strani zrna so na školjkastih prelomnih ploskvah mehanske ravne praske in V oblikovane vdolbine (Be4).
Conchoidal fracture surfaces with straight and arcuate steps on angular quartz grain. Mechanical straight scratches and V-forms are on the conchoidal fracture surfaces on the right lower side (Be4).
- E Zaobljeno, delno zglajeno kremenovo zrno z nepravilnimi vdolbinami raztapljanja (Be4)
Rounded, partly smoothed quartz grain with irregular solution pits (Be4)
- F Zaobljeno zrno kremenova z nepravilnimi vdolbinami raztapljanja (Be2)
Rounded quartz grain with irregular solution pits (Be2)

Tabla 1 – Plate 1



Hipotezo smo dopolnili z interpretacijo primarnega in sekundarnega izvornega območja alohtonega materiala.

Mineralna sestava težke frakcije kaže, da alohtoni material izvira iz metamorfo-magmatskega primarnega izvornega območja, na katerem so bile metamorfne kamnine bolj zastopane kot magmatske. To je bilo najverjetneje območje Centralnih Alp z Austroalpinsko in Penninsko enoto, predvsem kristalinski kompleks, ki ga grade orto- in paragnajsi, blestniki, kremenovi filiti in amfiboliti.

Večina opazovanih struktur površine na oglatih kremenovih zrn kaže, da so te nastale z lomi zrn, ki jih povezujemo predvsem z ledeniško abrazijo. S primarnega izvornega območja Centralnih Alp je material prenašal Dravski ledenik in ga odložil v tile. Ti so bili po umiku ledu koncem würma izpostavljeni rečni in eolski eroziji ter transportu in so predstavljali sekundarno izvorno območje alohtonega materiala v tleh obravnavanega območja. Severni vetrovi so prenašali pretežno meljasti material tudi preko grebena Karavank. Ta se je začel odlagati na južnih, zavetrnih pobočjih Karavank, kjer so na sedlih odložene največje debeline tega materiala (Belca, Golica sl. 1, 2) in je segal proti jugu vsaj na območje visokih planot Julijskih Alp, verjetno pa še dalje.

Naštete značilnosti kažejo na poligenetski tip tal na karbonatnih kamninah Zahodnih Karavank in visokih planot Julijskih Alp.

Zahvala

Raziskave prikazane v članku so bile izvedene v okviru raziskovalnega programa »Sedimentologija in mineralne surovine«, ki ga financira Agencija za raziskovanje SR. Za pomoč pri SEM analizah se zahvaljujemo Milošu Milerju, za pripravo vzorcev in granulometrične analize pa tehničnemu sodelavcu Stanetu Zakrajšku.

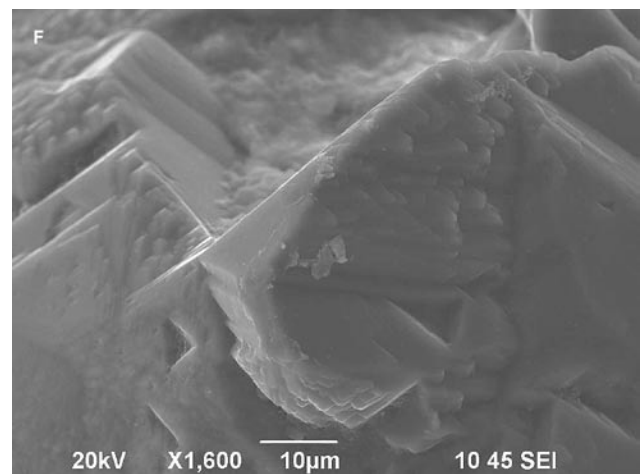
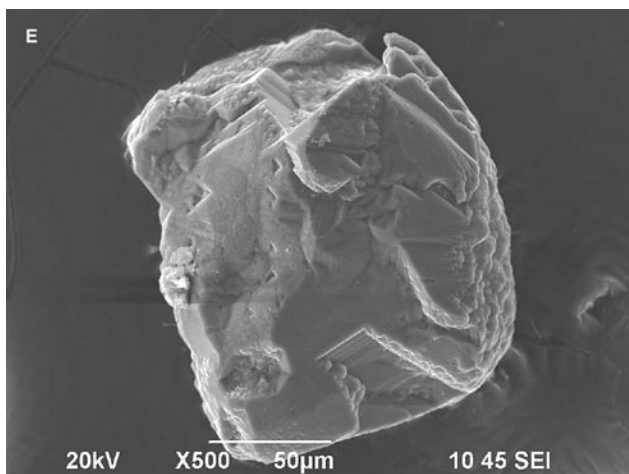
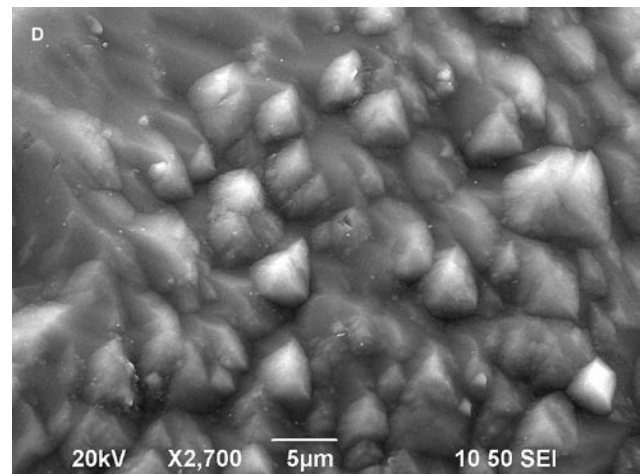
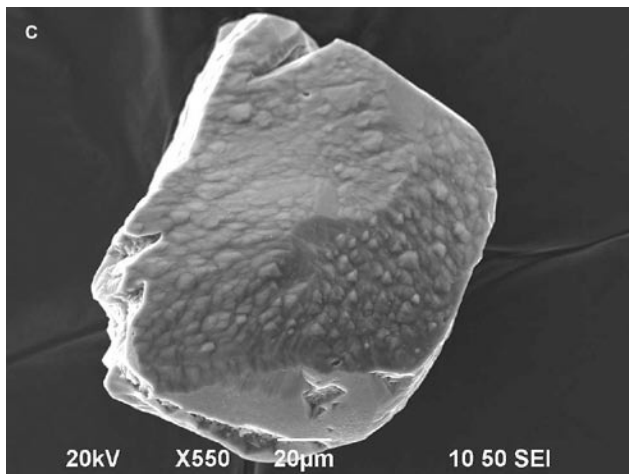
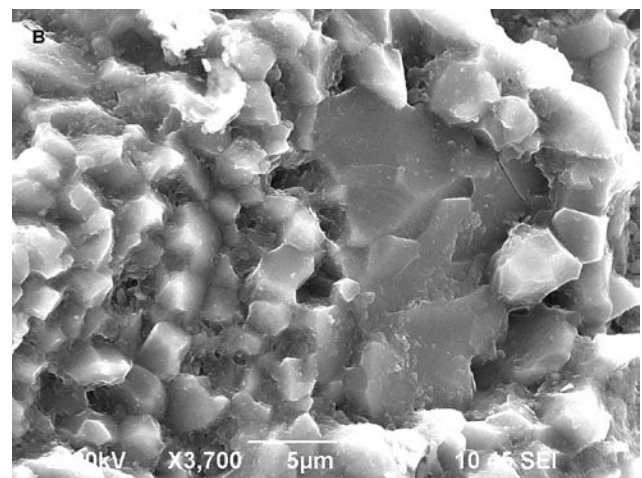
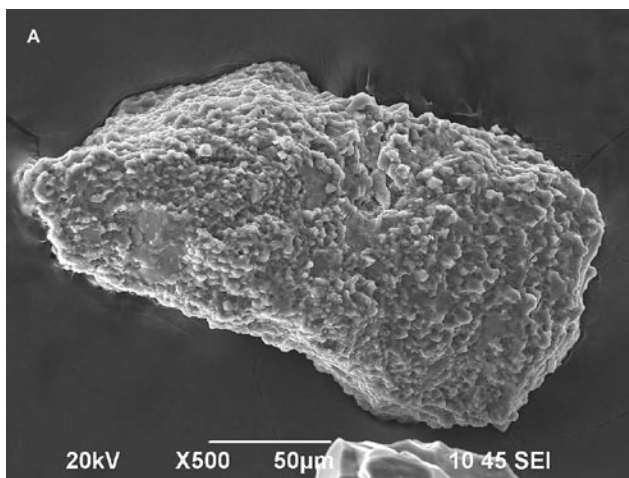
Literatura

- AL-SALEH, S. & KHALAF, F. I. 1982: Surface texture of quartz grain from various recent sedimentary environments in Kuwait. *Jour. Sedim. Petrology (Tulsa)* 52: 215–225.
- BALAGH, T. M. & RUNGE, E. C. A. 1970: Clay rich horizons over limestone, illuvial or residual. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34:534–536.
- BUSER, S. & CAJHEN, J. 1978: Osnovna geološka karta SFRJ 1 : 100.000, list Celovec. Zveznigeološki zavod (Beograd).

Tabla 2 – Plate 2

- A Polikristalno kremenovo zrno (Be2)
Polycrystalline quartz grain (Be2)
- B Polikristalno kremenovo zrno. Večje kremenovo zrno obdajajo manjša poligonalna zrnca kremenena. Detajl s Tab. 2 A.
Polycrystalline quartz grain. The larger quartz grain is surrounded by smaller polygonal quartz grains. Detail from Pl. 2 A.
- C Površino kremenovega zrna pokrivajo začetni drobni kristalčki kremenena, ki nakazujejo njegovo rast (Be4).
Surface of quartz grain is covered by incipient small quartz crystals indicating its growth (Be4).
- D Drobni začetni kristalčki kremenena z delno razvitimi terminalnimi ploskvami – piramidami. Detajl s Tab. 2 C.
Incipient small quartz crystals with partly developed terminal plains – pyramids. Detail from Pl. 2 C.
- E Kremenovo zrno z vidnimi kristalnimi ploskvami, večinoma piramidami. Na nekaterih izmed njih so v smeri rasti orientirani začetni kristalčki kremenena. Na površini so vidni trikotni preseki por, nepopolnoma zaraščeni deli kristala (Be1).
Quartz grain with crystal planes mostly pyramids. Small incipient quartz crystals oriented in the direction of the growth on some crystal planes. Triangular intersections of pores, incompletely grown parts of the crystal are seen on the surfaces (Be1).
- F Na kristalnih ploskvah – piramidah so v smeri njihove rasti orientirani začetni kristalčki kremenena. Na površini so vidni tudi trikotni preseki por, nepopolnoma zapolnjeni deli kristala. Detajl s Tab. 2 E.
On crystal plains – pyramids are small incipient quartz crystals oriented in the direction of their growth. Triangular intersections of pores, incompletely grown parts of the crystal are seen on the surfaces. Detail from Pl. 2 E.

Tabla 2 – Plate 2

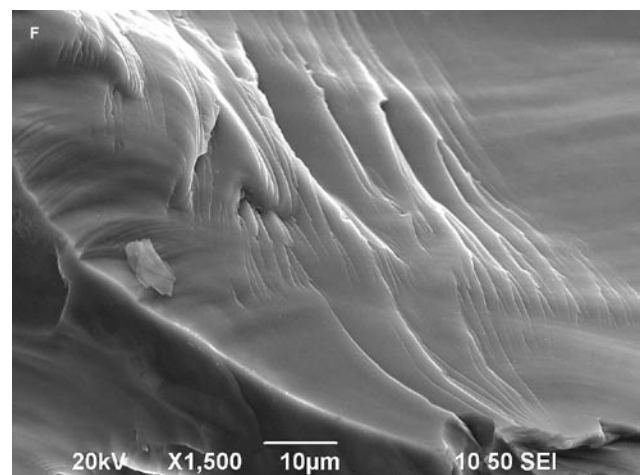
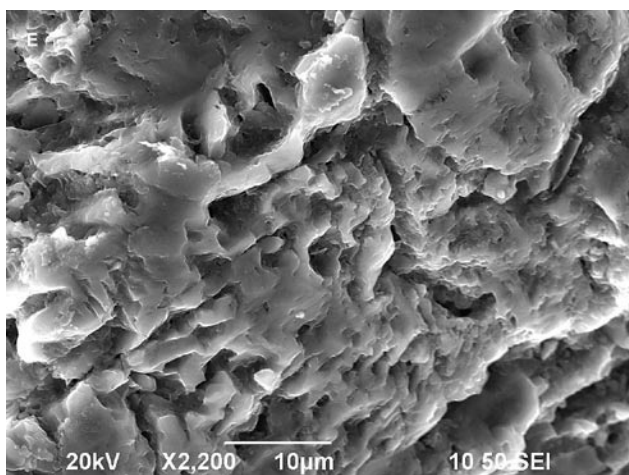
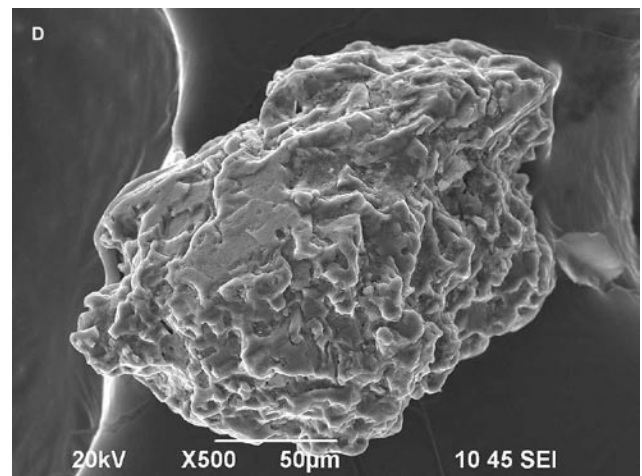
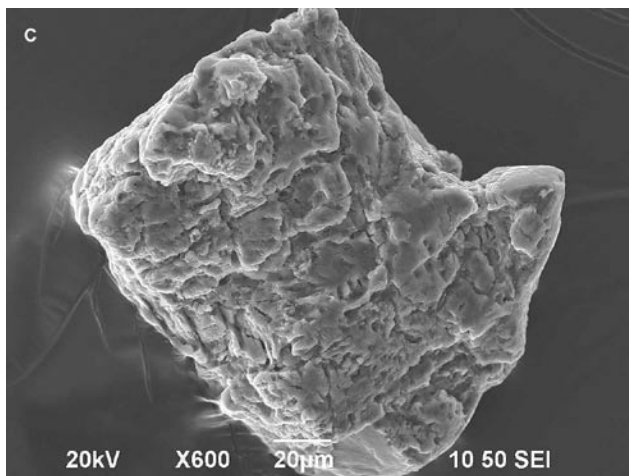
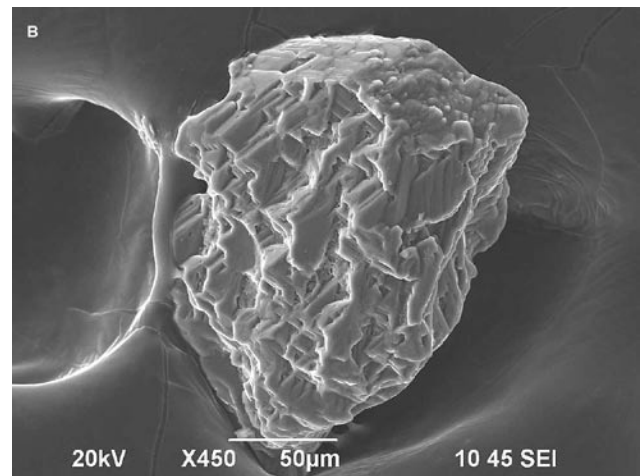
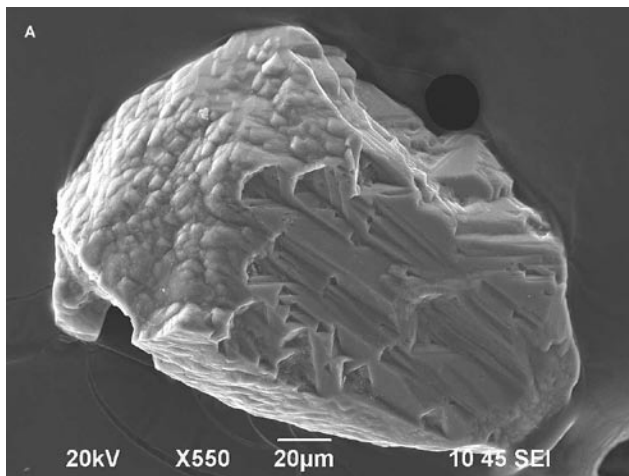


- BUSER, S. 1980: Tolmač lista Celovec, Osnovna geološka karta SFRJ 1 : 100.000, list Celovec. Zvezni geološki zavod (Beograd): 1–62.
- BUSER, S. 1987: Osnovna geološka karta SFRJ 1 : 100.000, list Tolmin in Videm/Udine. Zvezni geološki zavod (Beograd).
- BUSER, S. 1989: Development of the Dinaric and Julian carbonate platforms and of the intermediate Slovene basin (NW Yugoslavia). *Mem. Soc. Geol. It. (Roma)* 40 (1897): 313–320.
- CARTER, J. M. L. 1984: An application of scanning electron microscopy of quartz sand surface texture to the environmental diagnosis of Neogene carbonate sediment, Finestrat Basin, south-east Spain. *Sedimentology (Oxford)* 31:717–731.
- CAILLEUX, A. 1952: Morphoskopische Analyse der Geschiebe und Sandkörner und ihre Bedeutung für die Paläoklimatologie. *Geol. Rdsch. (Stuttgart)* 40: 11–19.
- CREMASCHI, M. 1990: The loess in northern and central Italy: a loess basin between the Alps and the Mediterranean regions. In: CREMASCHI, M. (ed.): *The Loess in Northern and Central Italy*. Centro di Studio per la Stratigrafia e Petrografia delle Apli Centrali, Editrice Gutenberg (Milano) 15–19.
- CUCCHI, F., FORTI, F. & MARINETTI, A. 1997: Surface degradation of carbonate rocks in the karst of Trieste (Classic Karst, Italy). Fieldtrip guide, Meeting M³, Fourth International Conference on Geomorphology (Trieste) 3–8.
- CULVER, S. J., BULL, P. A., CAMPBELL, S., SHAKESBY, R. A. & WHALLEY, W. B. 1983: Environmental discrimination based on quartz grain surface textures: a statistical investigation. *Sedimentology (Oxford)* 30: 129–136.
- ČIRIČ, M. 1984: Pedologija. SOUR Svjetlost (Sarajevo) 1–312.
- DANIN, A., GERSON, R. & CARTY, J. 1983: Weathering patterns on hard limestone and dolomite by endolithic lichens and cyanobacteria: Supporting evidence for eolian contribution to terra rossa soil. *Soil Science (Baltimore)* 136: 213–217.
- DURN, G. 2003: Terra rossa in the Mediterranean region: parent material, composition and origin. *Geologica Croatica (Zagreb)* 56/1: 83–100.
- DURN, G. & ALJINOVIĆ, D. 1995: Heavy minerals assemblage in terra rossa from the peninsula of Istra, Croatia. 1st Croatian Geological Congress, Abstracts (Opatija) 31.
- DURN, G., OTTNER, F. & SLOVENEK, D. 1999: Mineralogical and geochemical indicators of the polygenetic nature of terra rossa in Istria, Croatia. *Geoderma (Amsterdam)* 91: 125–150.
- DURN, G., OTTNER, F., TIŠLJAR, J., MINDSZENTY, A. & BARUDŽIJA, U. 2003: Regional subaerial unconformities in shallow-marine carbonate sequence of Istria: sedimentology, mineralogy, geochemistry and micromorphology of associated bauxites, palaeosoils and pedo-sedimentary complexes. In: VLAHOVIĆ, I. & TIŠLJAR, J. (eds.): *Evolution of delositional environments from the Palaeozoic to the Quaternary in the Karst Dinarides and Pannonian Basin*. Field Trip Guidebook, 22nd IAS Meeting of Sedimentology, Opatija 2003. Inštitut za geologijo (Zagreb) 207–254.

Tabla 3 – Plate 3

- A Kremenovo zrno s strukturami rasti s številnimi porami in ploskvijo pokrito z drobnimi začetnimi kristalčki orientirani v smeri rasti (Be1).
Growth structures with numerous pores, and surface covered by small incipient quartz crystals oriented in the direction of their growth on the quartz grain (Be1).
- B Kremenovo zrno z nasekano prelomno ploskvijo, ki jo sestavljajo manjše ravne prelomne ploskve. Struktura nasekane prelomne ploskve s številnimi porami kaže na delno skeletno rast kremenovega zrna. V zgornjem delu je ena ploskev zrna pokrita z drobnimi začetnimi kristalčki (Be1).
Quartz grain with finely cut rupture plane composed by smaller rupture planes. Structure of finely cut rupture plane and numerous pores show on skeleton growth of quartz grain. On the upper part of the grain is surface covered by small incipient quartz crystals (Be1).
- C Zelo kemično razjedeno zrno glinenca – plagioklaza-albita s številnimi plitvimi in globokimi nepravilnimi vdolbinami raztapljanja (Be4).
Intensive chemical corrosion of a feldspar grain (plagioclase-albite) with numerous shallow and deep solutions pits (Be4).
- D Zelo kemično razjedeno zrno glinenca – plagioklaza-albita (Be2).
Intensive chemical corrosion of a feldspar grain (plagioclase-albite) (Be2).
- E Plitve in globoke nepravilne vdolbine raztapljanja na površini zrna albita. Detajl s Tab. 3 C.
Shallow and deep irregular solutions pits on the albite grain. Detail from Pl. 3 C.
- F Upognjene stopničke na školjkasti prelomni ploskvi. Detajl s Tab. 1 B.
Arcuate steps on conchoidal fracture surfaces. Detail from Pl. 1 B.

Tabla 3 – Plate 3

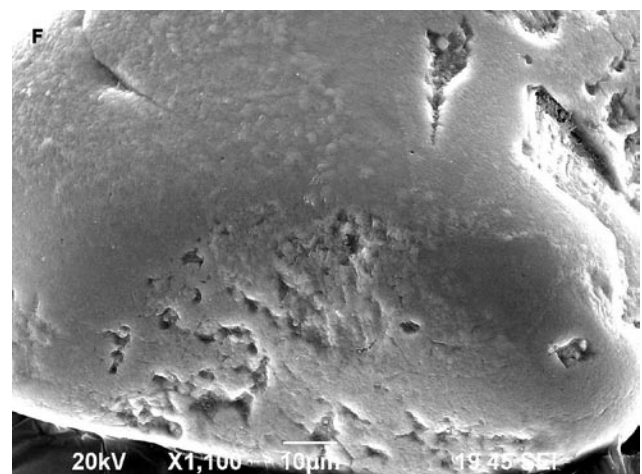
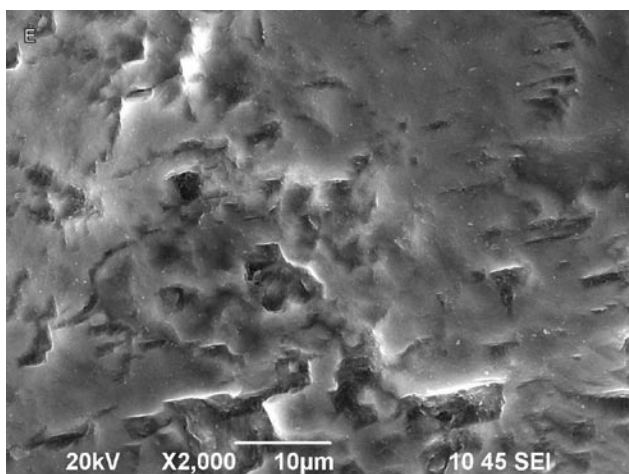
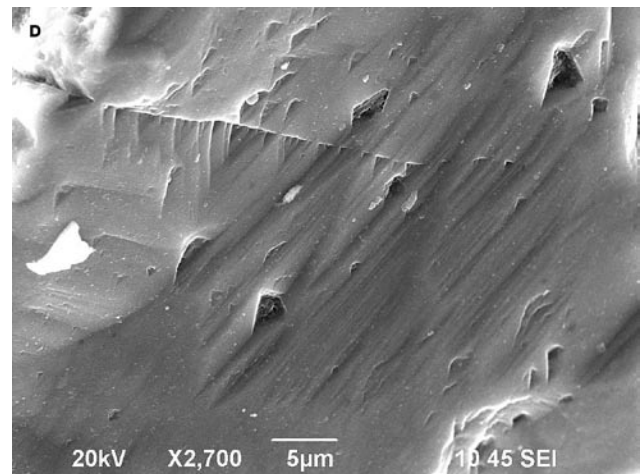
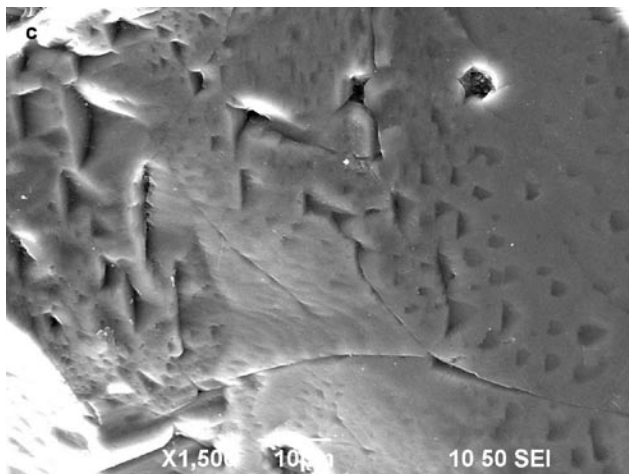
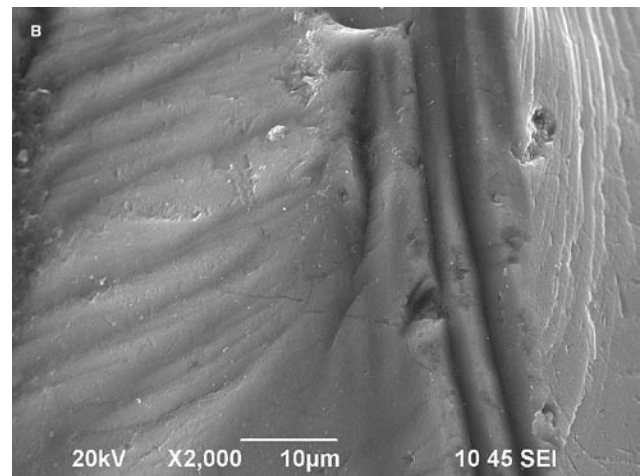
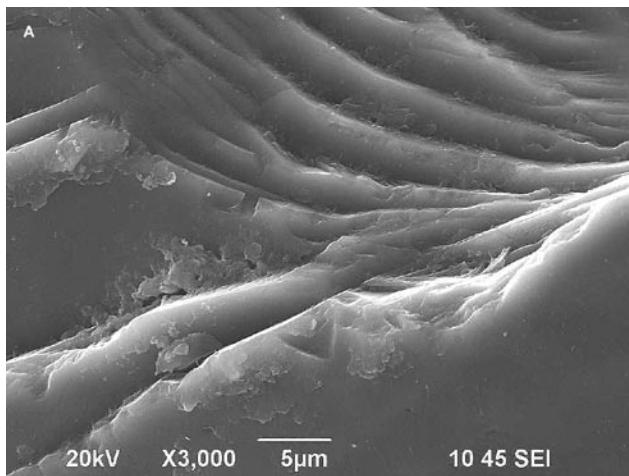


- GAMS, I. 1962: Meritve korozijske intenzitete v Sloveniji in njihov pomen za geomorfologijo. *Geografski vestnik (Ljubljana)* 34: 3–20.
- GAMS, I. 1974: *Kras*. Slovenska matica (Ljubljana) 1–359.
- GAMS, I. 1985: Mednarodne primerjalne meritve korozije s pomočjo standardnih apnenčevih tablet. Internal comparative measurements of surface solution by means of standard limestone tablets. *Razprave IV razreda SAZU (Ljubljana)* 26: 361–386.
- GRAD, K. & FERJANČIČ, L. 1974: Osnovna geološka karta SFRJ 1 : 100.000, list Kranj. Zvezni geološki zavod (Beograd).
- GRAD, K. & FERJANČIČ, L. 1976: Tolmač lista Kranj, Osnovna geološka karta SFRJ 1 : 100.000, list Kranj. Zvezni geološki zavod (Beograd): 1–70.
- HIGGS, R., 1979: Quartz grain surface features of Mesozoic-Cenozoic sand from the Labrador and Western Greenland continental margins. *Jour. Sedim. Petrology (Tulsa)* 49: 599–610.
- HOČEVAR, H. 1995: Nastanek tal na ladinijskih apnencih na področju Mežice. Disertacija, Univerza v Ljubljani (Ljubljana) 1–177.
- JACKSON, M. L., CLAYTON, R. N., VIOLANTE, A. & VIOLANTE, P. 1982: Eolian influence on terra rossa of Italy traced by isotopic ratio. In: VAN OLPHEN, H. & VENIALE, F. (eds.): 7th Int. Clay Conf. Pavia, Italy (Pavia) 293–301.
- KRINSLEY, D. H. & TAKAHASHI, T. 1962: The surface textures of sand grains, an application of scanning electron microscopy. *Science (Washington)* 138: 1262–1265.
- KRINSLEY, D. H. & DONAHUE, J. 1968: Environmental interpretation of sand grain surface texture by electron microscopy. *Bull. Geol. Soc. Am. (Boulder)* 79: 743–748.
- KRINSLEY, D. H. & DOORNKAMP, J. 1973: *Atlas of Quartz Sand Surface Textures*. Cambridge University press (Cambridge) 1–99.
- MACLEOD, D. N. 1980: The origin of the red Mediterranean soils in Epirus, Greece. *Journal of Soil Science (London)* 31: 125–136.
- MARGOLIS, S. V. & KRINSLEY, D. H. 1974: Proces of forming and environmental occurrence of microfutures on detrital quartz grains. *Am. J. Sci.* 274: 449–464.
- MCHALET, B., SMALLEY, I., O'HARA-DHAND, K., FRENCH, M., HAMBACH, U., ALI, Z.-P., MARKOVIĆ, B. S., OCHES, A. E. & ZÖLLER, L. 2008: Particle size distribution in loess deposits – New insight into inter-hemispheric linkages of past atmospheric circulation and aeolian dust dynamics recorded in Danube and Central Asian Loess. *Abh. Geol. B.-A. (Wien)* 199–200.

Tabla 4 – Plate 4

- A Na ravnih in ukrivljenih stopničkah so opazne mehanske nepravilne in V oblikovane vdolbine, med in na nekaterih stopničkah pa tudi prilepljena zrna. Detalj s Tab. 1 C.
On straight and arcuate steps are mechanical small irregular and V-form pits, between and on some steps are also adhering particles. Detail from Pl. 1 C.
- B Školjkaste prelomne ploskve z ravnimi in ukrivljenimi stopničkami ter mehanskimi mlajšimi nepravilnimi vdolbinami (Be3).
Conchoidal fracture surfaces with straight and arcuate steps and mechanical smaller irregular pits (Be3).
- C Na ravni prelomni ploskvi so vidne ravne in ukrivljene praske in razpoke ter V in v manjši meri nepravilno oblikovane vdolbine. Del V oblikovanih vdolbin je lahko posledica kemičnega raztapljanja (Be4).
Straight and curved scratches and cracks, V forms and in a lesser extent irregular pits. Some V forms could be cause of chemical solution (Be4).
- D Na ravni prelomni ploskvi kremenovega zrna so vidni mehansko nastali vzporedni grebenčki in žlebiči ter nekatere V oblikovane vdolbine. Večina orientiranih V oblikovanih vdolbin kaže na kemično raztapljanje – jedkanje kremenca (Be2).
On even fracture plane of a quartz grain are mechanical, straight parallel grooves and some V-forms. The best oriented V-forms developed by chemical solution – the etching of quartz (Be2).
- E Nepravilne in deloma V oblikovane vdolbine raztapljanja. Detajl s Tab. 1 F.
Irregular and V-form solution pits developed by chemical etching. Detail from Pl. 1 F.
- F Nepravilne vdolbine raztapljanja, na zglajeni površini so tudi strukture, ki kažejo na izločanja kremenca. Detajl s Tab. 1 E.
Chemically etched irregular solution pits on smoothed surface with some structures indicating precipitation of quartz. Detail from Pl. 1 E.

Tabla 4 – Plate 4



- MELIK, A. 1930: Bohinjski ledenik. Geografski vestnik (Ljubljana) 5–6: 1–39.
- LIPPI-BONCAMPI, C., MACKENZIE, R. C. & MITCHELL, W. A. 1955: The mineralogy of some soils from Central Italy. Clay Mineral Bulletin 2: 281–288.
- OGORELEC, B. 1988: Mikrofazies, Geochemie und Diagenese des Dachsteinkalkes und Hauptdolomits in Süd-West-Slowenien, Jugoslawien. Dissertation, Universität Heidelberg (Heidelberg) 1–173.
- OGORELEC, B. & ROTHE, P. 1993: Mikrofazies, Diagenese und Geochemie des Dachsteinkalks und Hauptdolomits in Süd-West-Slowenien. Geologija (Ljubljana) 35: 81–181.
- OLSON, C. G., RUHE, R. V. & MAUSBACH, M. J., 1980: The terra rossa limestone contact phenomena in Karst, Southern Indiana. Soil Sci. Am. J. (Madison) 82: 1075–1079.
- PLACER, L. 1999: Contribution to the macrotectonic subdivision of the border region between Southern Alps and External Dinarides. Geologija (Ljubljana) 41 (1998): 223–255.
- PLACER, L. 2008: Principles of the subdivision of Slovenia. Geologija (Ljubljana) 51/2: 205–217.
- PLENIČAR, M. & DOZET, S. 1994: Contribution to the knowledge of Upper Cretaceous beds in Kočevje and Gorski Kotar area (NW Dinarides). Geologija (Ljubljana) (1993) 36: 183–194.
- PYE, K. 1987: Aeolian dust and dust deposits. Academic Press (London) 1–334.
- RAPP, A. 1984: Are terra rossa soils in Europe eolian deposits from Africa? Geologiska Foreninges et Stockholm Forhandlingar (Stockholm) 105: 161–168.
- SKABERNE, D. 1980: Predlog klasifikacije in nomenklature klastičnih sedimentnih kamnin I. del: Predlog granulomertične klasifikacije in nomenklature. Rud.-metal. zb. (Ljubljana) 27: 21–46.
- SMALLEY, I. J. 1995: Making the material: the formation of silt-sized primary material particles for loess deposits. Quaternary Science Reviews (Amsterdam) 14: 645–651.
- ŠIFRER, M. 1952: Obseg poledenitve na Pokljuki. Geografski vestnik (Ljubljana) 24: 95–114.
- ŠINKOVEC, B. 1974: Porijeklo terra rosse Istre. Geološki vjestnik (Zagreb) 27: 227–237.
- VAN HUSEN, D. 1987: Die Ostalpen in den Eiszeiten. Geologischen Bundesanstalt (Wien) 1–24.
- YAALON, D. H. 1997: Soils in the Mediterranean region: what makes them different? Catena (Amsterdam) 28: 157–169.
- YAALON, D. H. & GANOR, E. 1973: The influence of dust soil during the Quaternary. Soil Science (Baltimore) 116: 233–251.
- ZIMDARS, J. 1958: Über Korn-Oberfläche von Sanden. Eine kritische Betrachtung der morphoskopischen Quarzkornanalyse. Dissertation, Universität Tübingen (Tübingen) 1–92.
- ZUPAN-HAJNA, N. 2003: Incomplete Solution: weathering of cave walls and the production, transport and deposition of carbonate fines. Carso-logica, Založba ZRC, Inštitut za raziskovanje krasi ZRC SAZU (Ljubljana) 1–167.
- <http://www.arso.gov.si/vreme/napovedi%20in%20podatki>

Application of SEM/EDS to environmental geochemistry of heavy metals

Uporaba SEM/EDS v okoljski geokemiji težkih kovin

Miloš MILER & Mateja GOSAR

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

Prejeto / Received 20. 3. 2009; Sprejeto / Accepted 23. 4. 2009

Key words: environmental geochemistry, heavy metals, mining, smelting, SEM/EDS, sediments, mining waste dumps, environmental risk, pollution, environment

Ključne besede: geokemija okolja, težke kovine, rudarjenje, metalurgija, SEM/EDS, sedimenti, rudarski odpadki, okoljsko tveganje, onesnaženje, okolje

Abstract

Heavy metals represent a ubiquitous constituent of the near-surface environment, present in widely varying concentrations that typically have little impact on human behaviour and health. However, the mining of metals and use of these metals in industrial processes has produced significant anthropogenic inputs of metals to both local and global environments. As such, a rigorous overview of the current accumulation of heavy metals and knowledge of mineralogy of heavy metal-bearing phases is important for understanding their stability, solubility, mobility, bioavailability and toxicity. These data are of fundamental importance for environmental risk assessment and evaluation of future scenarios. Since conventional geochemical analyses provide limited information, other analytical methods have to be utilized for the characterisation of heavy metal-bearing phases. Significant analytical method for identification and characterisation of heavy metals in environmental media is a scanning electron microscope coupled with energy dispersive X-ray spectrometer (SEM/EDS), an apparatus for qualitative and semi-quantitative chemical analysis at microne level, newly introduced to Geological Survey of Slovenia. Use of SEM/EDS was already introduced to environmental studies world-wide. In Slovenia, SEM/EDS analyses of environmental media were firstly carried out on the Meža River stream sediments and snow deposits from Ljubljana urban area.

Heavy metal-bearing phases in the Meža River stream sediments were apportioned to three source areas: Mežica mining/smelting area (geogenic-technogenic origin), Ravne ironworks area (technogenic origin) and the Meža River catchment area (geogenic origin), which corresponds to data obtained by conventional geochemical and multivariate statistical methods.

Airborne particles, identified in urban snow deposits, were interpreted as geogenic particles, represented by fragments of heavy metal-bearing minerals, and technogenic particles that originate from combustion of solid and liquid fuels, iron and steel melting processes and road traffic emissions.

SEM/EDS proved to be a very useful analytical method for the study of heavy metal-bearing phases and characterisation according to their sources and genesis.

Izvleček

Težke kovine predstavljajo naravno navzoče sestavine v Zemljini skorji in na njeni površini, prisotne v zelo različnih koncentracijah. V splošnem imajo majhen vpliv na zdravje človeka. Rudarjenje teh kovin in njihova uporaba v industriji pomembno prispevajo k antropogenemu vnosu kovin v okolje. Natančen pregled obstoječih nakopičen težkih kovin v naravnih okoljih in poznavanje mineralnih faz, ki vsebujejo težke kovine je zatorej bistvenega pomena za opredelitev njihove stabilnosti, topnosti, mobilnosti, dostopnosti za živa bitja in toksičnosti ter za oceno tveganja in napoved možnih scenarijev v prihodnosti. Ker običajne geokemične metode nudijo le omejene informacije, je potrebno za opredelitev faz težkih kovin uporabiti druge analitične metode. Pomembna metoda za prepoznavanje in opredelitev težkih kovin v okolju je vrstični elektronski mikroskop z energijsko disperzijskim spektrometrom rentgenskih žarkov (SEM/EDS), naprava za kvalitativno in semi-kvantitativno kemijsko analizo na mikronskem nivoju, ki je bila pred kratkim vpeljana tudi na Geološki zavod Slovenije. Uporaba SEM/EDS v okoljskih študijah je v svetu že dobro uveljavljena. V Sloveniji so bile prve analize okoljskih medijev s SEM/EDS izvedene na rečnih sedimentih reke Meže in snežnih depozitih urbanega območja Ljubljane, kar podajamo v tem prispevku.

V sedimentih reke Meže so bila določena tri izvorna območja težkih kovin: območje rudarjenja in predelave svinčevo-cinkove rude v Mežici (geogeno-tehnogeni izvor), območje železarne Ravne (tehnogeni izvor) in porečje reke Meže (geogeni izvor), kar se ujema z rezultati običajnih geokemičnih in multivariatnih statističnih metod.

Trdni delci v snegu urbanega okolja pripadajo geogenim delcem, ki jih predstavljajo drobci mineralov s težkimi kovinami, in tehnogenim delcem, ki izvirajo iz procesov izgorevanja trdnih in tekočih goriv, taljenja železa in obdelave jekel ter emisij prometa.

SEM/EDS se je izkazal kot zelo uporabna analitična metoda za proučevanje faz težkih kovin in za njihovo opredelitev glede na njihov izvor in nastanek.

Introduction

Contamination of the Earth's ecosystems by potentially toxic metals is a global problem. It will probably grow with our planet's increasing population and their requirements for natural resources. Environmental geochemistry is the discipline that uses the chemistry of the solid earth, its aqueous and gaseous components, and life forms to assess contamination impacts on our planet's ecosystems (SIEGEL, 2002; ALBARDE, 2003). Environmental geochemical data identify pristine chemical conditions that pose no threats to ecosystem inhabitants, those that may suffer from natural sources (rock weathering and decomposition) and environments that are at risk from pollution as a result of human activities. Identifying metal loadings between natural and anthropogenic sources is in focus of geochemical studies as chemical damage to the environment often originates from a combination of natural and anthropogenic input. The type and speciation of an individual heavy metal determines its mobility between environmental media and its availability to organisms. Because of ecotoxicological effects of heavy metals, it is important to study the pathways of heavy metals into ecosystem and living organisms, their bioavailability, bioaccumulation, and general health effects.

Heavy metals represent a ubiquitous constituent of the near-surface environment, present in widely varying concentrations that typically have little impact on human behaviour and health. However, there are several sources of metals in the environment, both natural and manmade, thus localized enrichments of metals often result in elevated metal concentrations in the surrounding environment. The natural sources of metals in environment lie with the rocks and processes by which they formed and which affected them after lithification. High values of metals are found, for example, in mineralized areas and in areas where the dominant bedrock is rich in metals as, for example, in black shale. Volcanic emissions and forest fires are natural springs of some metals in the atmosphere (gases, aerosols, particulates) and after they precipitate they become part of the near-surface ecosystems. There are many anthropogenic sources in the environment: coal combustion residues, mining, metal-smelting industries, car emissions, military actions (PIRC & BUDKOVIČ, 1996; GREIČIŪTĖ et al., 2007; IDZELIS et al., 2006) and primary input sources in agro-ecosystems (fertilizers, liming materials, sewage sludges, pesticides, irrigation water) (ADRIANO, 1986).

The mining and metal industry can be an important source of trace elements in the environment from (a) the mining and milling operations with problems of grinding, concentrating and transporting ores, and disposal of tails along with mine and mill waste water and (b) the smelter-refinery process with problems of concentrate, haulage, storage, sintering, atmospheric discharges and blowing dust (ADRIANO, 1986; DUDKA & ADRIANO, 1997; JORDAN, 2009). The proportion of trace elements releases into environment depends on ores

being processed. Mining itself affects relatively small areas. It is the tailings and waste rock deposits close to the mining area that are the source of the metals (HOSKIN et al., 2000). The impacts of atmospheric discharges (gaseous and particulate matter emissions) from smelters can be detected within several kilometres from the point of release. Natural background contamination, often present in mining areas due to underlying mineralisation, adds to the complexity of the environmental assessment of contamination at mining sites. Knowledge of the mineralogy of heavy metal-bearing phases is important in understanding their stability, solubility, mobility, bioavailability and toxicity, modelling their future behaviour; and developing remediation strategies (HUDSON-EDWARDS, 2003).

One of the roles of environmental geochemistry is to scientifically evaluate how to manage metals at sources or in-situ so as to alleviate or eliminate their negative health impacts on living population. This is initiated by identifying pollution sources and by developing models of pollutant transport in different environmental media and by studying mobilization, interaction, deposition and accumulation of potentially toxic metals in source system and our planet's ecosystem.

Scanning electron microscope coupled with energy dispersive X-ray spectrometer (SEM/EDS) is an apparatus for qualitative and semi-quantitative chemical analysis at microne level, introduced to Geological Survey of Slovenia (GeoZS) in 2008. This analytical method was recently implicated into environmental researches of heavy metal-polluted environmental media in Slovenia. SEM/EDS microanalysis opened a new field of research in geochemistry and environmental geology in Slovenia, since no researches related to application of SEM/EDS to environmental studies of heavy metal pollution have been reported yet. Main contribution of the method is characterisation of heavy metal-bearing phases that represent primary potential pollutants in environmental media, according to their sources. Source apportionment is very important for localization of pollution sources and ascertainment of the degree of negative impacts, arising from individual heavy metal sources, natural and anthropogenic. Since conventional geochemical analyses, using sequential extraction preparation methods, provide limited information on mineralogy of heavy metal-bearing phases, SEM/EDS is very important for the assessment of bioavailability of heavy metals from heavy metal-bearing phases, according to chemical and physical properties of mineral species of these phases (HUDSON-EDWARDS, 2003).

Basic principles of SEM/EDS and identification of heavy metal-bearing phases

Basically, electron microscope employs a beam of electrons and exploits the wavelike properties of electrons to obtain an image. Scanning electron microscope, employed at GeoZS, contains electron

source of tungsten wire filament, which is heated to emit electrons that are accelerated by an anode. The electron beam diameter is regulated by electromagnetic condenser lenses and focused by objective lens into a probe point on the surface of the specimen (GOLDSTEIN et al., 2003; SAMARDŽIJA, 2004; ZHOU et al., 2006). Since the wavelength of the electron beam is much lower than that of visible light, resolution and useful magnification of SEM are much higher. Scanning coils move probe spot across specimen surface to form specimen image (Fig. 1).

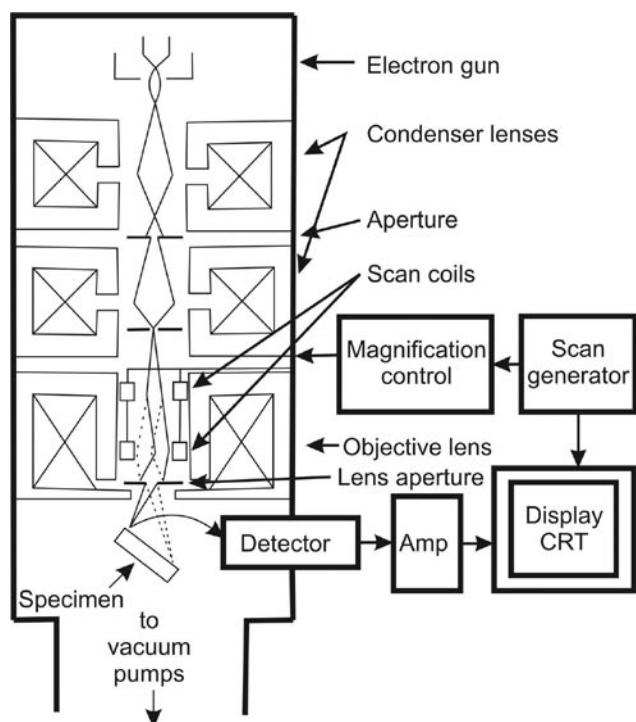


Fig. 1. Scheme of SEM and its operation (after GOLDSTEIN et al., 2003)

Sl. 1. Shema zgradbe SEM in njegovo delovanje (po GOLDSTEIN et al., 2003)

Interaction of electron beam with sample generates a variety of signals (secondary electrons (SE), backscattered electrons (BSE), characteristic X-rays, etc.). SE are low energy electrons generated near the specimen surface as a result of excitation of loosely bound outer-shell electrons and form topographic image of sample. BSE are those primary beam electrons that were strongly deflected by atomic nuclei in the sample, retaining most of their energy after leaving the sample (GOLDSTEIN et al., 2003), and thus forming compositional or Z-contrast image of the sample. Characteristic X-rays are generated deep in the sample as a result of interaction of electron beam with inner shell electron that is ejected and substituted with an electron from higher energy shell, emitting a photon of characteristic X-rays. Signals are detected by different detectors (scintillator (E-T) SE detector, semi-conductor BSE detector and semi-conductor EDS detector) that transform signals into image or characteristic X-ray spectra.

One of main chemical characteristics of chemical elements is their atomic number (Z), which is unique for each element and is a basis for BSE

imaging and X-ray (EDS) identification of heavy metal-bearing phases. The number of BSE is controlled by the atomic number of elements composing the sample. Elements with higher Z reflect more BSE than elements with lower Z, thus producing the so called Z-contrast or compositional contrast, which enables relative distinction between particles with different elemental composition. Heavy metals are electron dense elements with high atomic number and are effective electron backscatters.

Basic principles of heavy metal identification and characterisation are following. Firstly, the sample is examined in the backscattered electron (BSE) mode at low magnifications (Fig. 2) that allows localization of grains containing heavy metal-bearing phases in the sample (HOCELLA et al., 2005). They appear bright in a low Z matrix (BERNAUS et al., 2005; ARAGON et al., 2000).

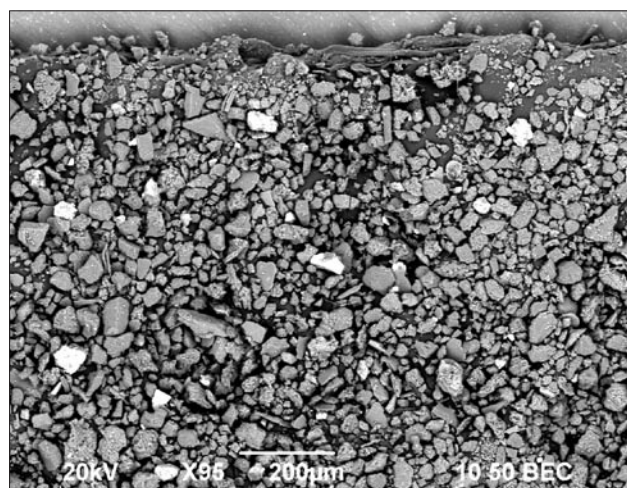


Fig. 2. Localization of heavy metal-bearing grains in BSE mode at low magnification

Sl. 2. Lociranje zrn, ki vsebujejo težke kovine v BSE načinu pri majhni povečavi

After localization of heavy metal-bearing grains in the sample with BSE imaging, qualitative and semi-quantitative chemical composition of selected grains is measured using energy dispersive X-ray spectrometer (EDS). EDS detects and processes X-rays that are emitted from constituent elements and are characteristic of each chemical element, dependent on its atomic number.

Combination of SEM and EDS is used for single particle analysis. It enables the detection of heavy metals whose contents, determined by conventional geochemical bulk sample analysis, are below the theoretical detection limit of the EDS. Detection of some metal trace elements are thus possible. Mineral phases of heavy metals are then assessed from atomic proportions of constituent elements, obtained by semi-quantitative X-ray microanalysis. High resolution of scanning electron microscope allows analysis of heavy metals in wide range of environmental media (from mining waste deposits, stream sediments and soils to urban sediments and atmospheric depositions in snow).

World-wide experiences of using SEM/EDS in environmental geochemistry studies of heavy metals

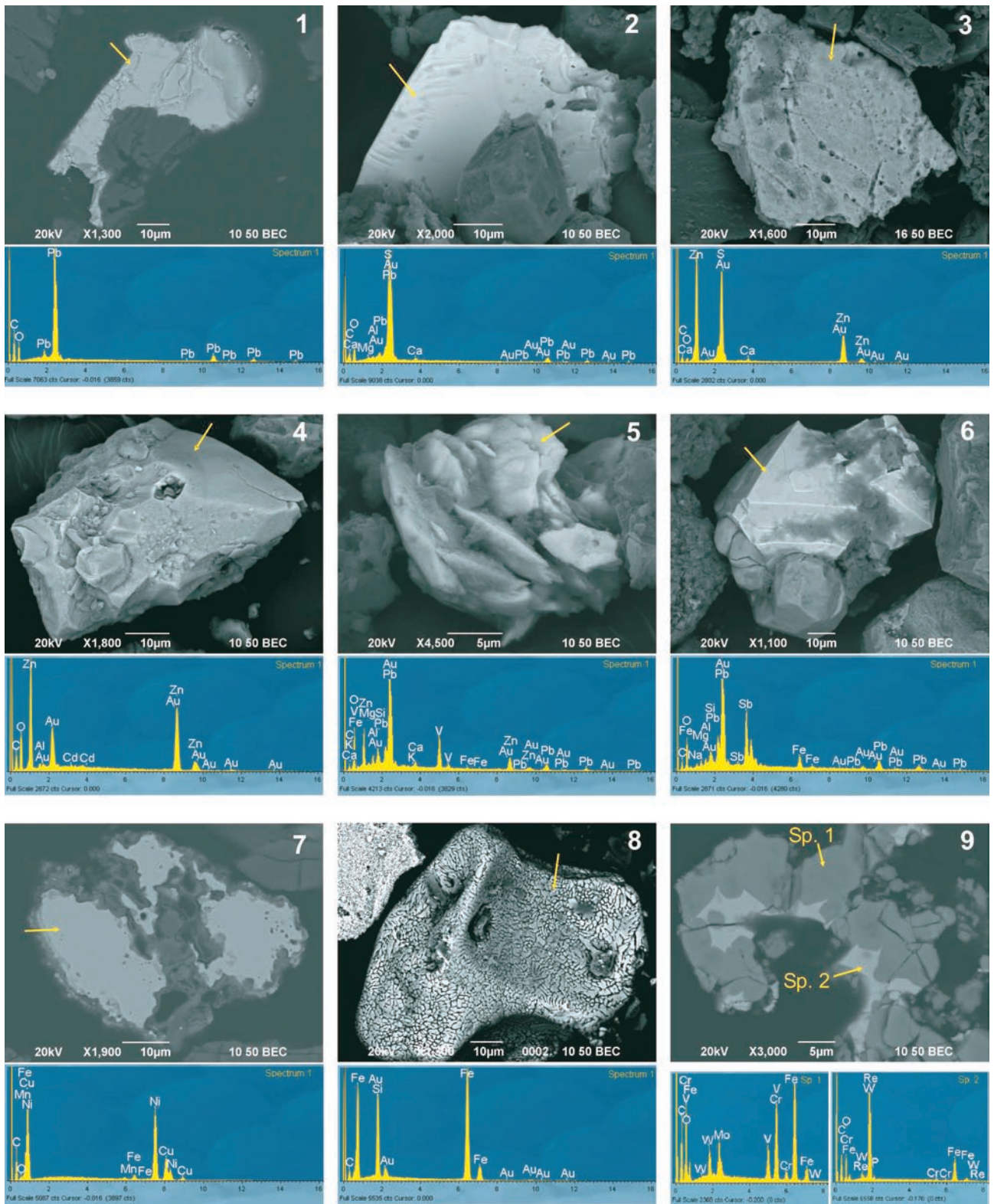
Characterisation of heavy metal-bearing pollutants in environmental media using SEM/EDS method was already successfully introduced to environmental studies world-wide. TRIMBACHER and WEISS (1999) investigated spruce needle surface characteristics and element contents. Heavy metal-bearing dust particles were detected only on needles from sites near pollutant sources. This method was used for characterisation and differentiation of areas with different pollution sources and levels (TRIMBACHER & WEISS, 2004). ARAGON and co-authors (2000) classified individual particles of heavy metal-bearing urban aerosols, according to their chemical or mineralogical composition and morphology, into different groups by their origin. HUDSON-EDWARDS (2003) reviewed the literature on the sources, mineralogy, chemistry and fate of heavy metal-bearing particles in mining-affected river systems and geochemical and mineralogical techniques, employed for characterisation of heavy metal-bearing particles, including SEM/EDS. KEMPPAINEN and co-authors (2003) studied the distribution of airborne particles in

the surroundings of an iron and steel factory in southern Finland and identified different particle types. JEONG and McDOWELL (2003) distinguished different sources of stream sediments from the Southern Central Lake Superior using SEM/EDS. HOCELLA and co-authors (2005) observed heavy metal-mineral associations in stream and floodplain sediment samples and established that the source of floodplain material are mine tailings and smelter wastes. BERNAUS and co-authors (2005) used the combination of SEM/EDS in order to evaluate the elemental background of ore, slag and soil samples from Almaden mercury mining area, while acquiring qualitative information on the chemical speciation of Hg-rich particles. SEM/EDS analyses of mercury and arsenic contaminated soils, calcines and tailings derived from Sb-Hg mineral deposit of the Valle del Azogue mine, confirmed that cinnabar, found in contaminated samples, is a secondary phase, precipitated after dissolution of Hg-rich pyrite (NAVARRO et al., 2006). VANEK and co-authors (2008) studied the binding of metallic contaminants on soil constituents in contaminated alluvial soil from the mining and smelting district of Příbram using a combination of mineralogical and chemical methods.

PLATE 1 – TABLA 1

- 1 Cerussite grain (arrow) associated with dolomite (polished section)
Zrno cerusita (puščica) v združbi z dolomitom (poliran obrus)
- 2 Galena with inclusions of dolomite
Galenit z vključki dolomita
- 3 Sphalerite grain, showing triangular pitting on its surface, caused by plucking or mineral dissolution
Zrno sfalerita s trikotnimi vdolbinami na površini, ki so posledica izpadanja materiala ali raztapljanja minerala
- 4 Smithsonite particle, containing minor amounts of Cd
Zrno smithsonita z manjšo vsebnostjo Cd
- 5 Descloizite crystal (PbZn(VO₄)(OH))
Kristal descloizita (PbZn(VO₄)(OH))
- 6 Octahedral crystal of (Pb, Sb)-oxide (arrow), presumably mineral bindheimite, associated with (Ca, Sb, Fe)-oxide
Oktaedrični kristal (Pb, Sb)-oksida (puščica), verjetno mineral bindheimit, v združbi z (Ca, Sb, Fe)-oksidom
- 7 (Cu, Ni, Fe)-alloy (polished section)
(Cu, Ni, Fe)-zlitina (poliran obrus)
- 8 Particle of (Fe, Si)-alloy
Delec (Fe, Si)-zlitine
- 9 (Mo, W, V, Cr, Fe)-oxide (Sp. 1) and (W, Cr, Fe)-oxide (Sp. 2) (polished section)
(Mo, W, V, Cr, Fe)-oksid (Sp. 1) in (W, Cr, Fe)-oksid (Sp. 2) (poliran obrus)

PLATE 1 – TABLA 1



Sample preparation and SEM/EDS analyses

SEM/EDS analyses of different environmental media such as stream sediments, dust, solid snow deposits and aerosols require specific sample pre-treatment. Proper sample preparation is thus one of the most critical steps in the SEM/EDS analysis.

Powdered samples of various environmental media are used for morphological studies and qualitative determination of mineral phases with X-ray microanalysis. Since the emphasis of sediment or aerosol analysis is not on their texture and structure, their preparation is simple. Powdered samples are sprinkled on double-sided carbon tape, the excess removed with compressed air and coated with thin layer of conductive material, usually gold or carbon, to promote their conductivity.

For semi-quantitative X-ray microanalysis, flat-polished sections of analyzed materials are required. Observed particles are embedded in araldite resin, polished flat and coated with carbon. Gold usually provides better SE emission and conductivity of the sample than carbon, but considerably influences results of semi-quantitative X-ray microanalysis, because it absorbs characteristic X-rays of lower Z elements and decreases intensities of their spectral lines. Therefore, carbon coating is usually used for semi-quantitative X-ray microanalyses on polished sections.

Regardless of sample preparation, some heavy metal-bearing mineral phases are difficult to distinguish from one another due to peak overlaps of X-ray spectral lines of constituent elements and limited resolution of the EDS.

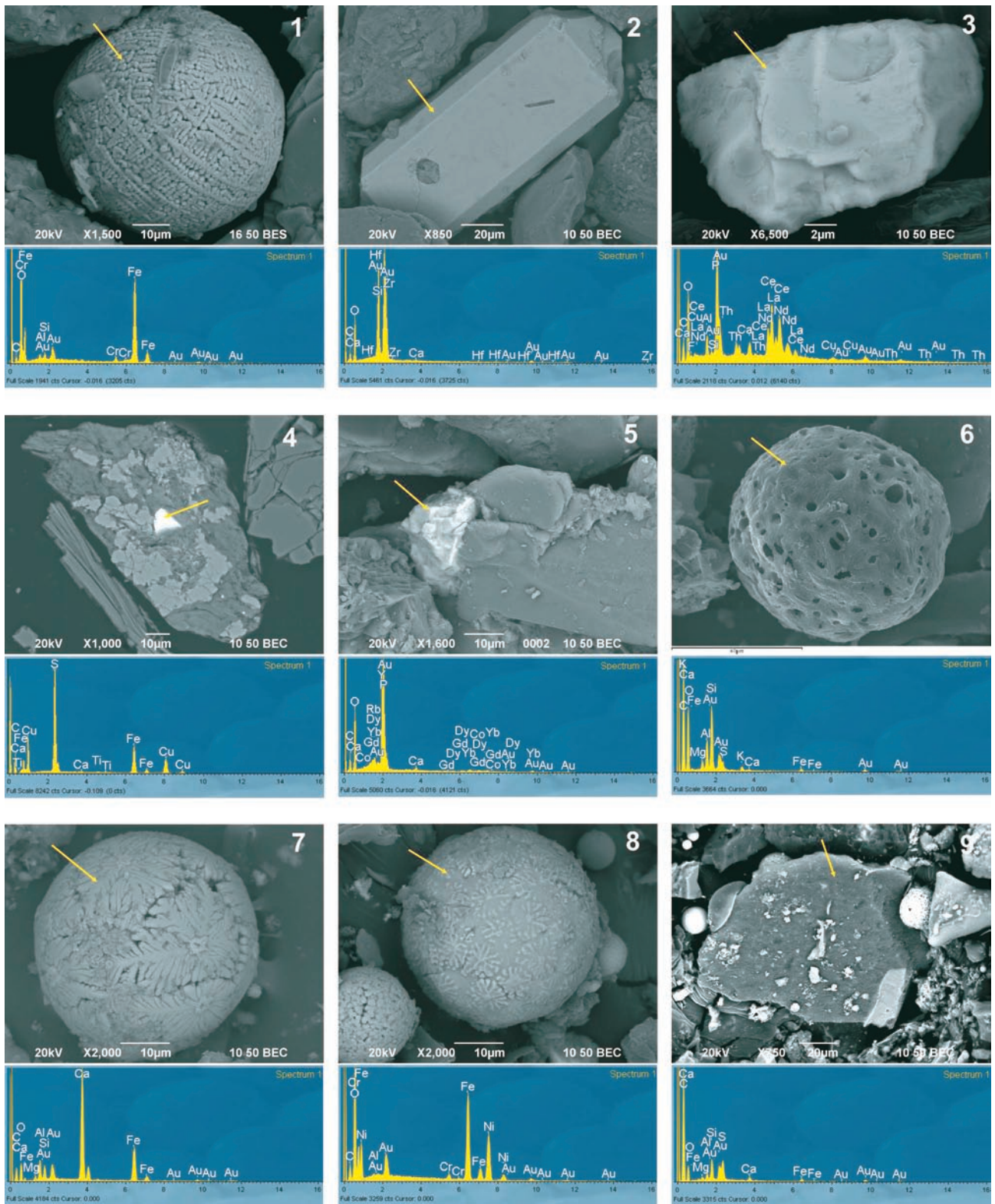
Stream sediments and solid material in urban snow deposits were selected as representative environmental and sampling media for SEM/EDS analyses in present study. Stream sediments reflect rock structure of the catchment area, its geochemical characteristics and possible recent contamination upstream of the sampling point (OTTESEN et al., 1989). Snow represents natural collector and ideal medium for observation of dry or wet deposited atmospheric constituents, such as aerosol particles, which are well preserved in the snow-cover as long as no melting occurs (SCHÖNER et al., 1997).

Stream sediment samples were oven-dried and sieved to the < 0,063 mm fraction. Both, powdered samples and polished sections were prepared. Snow samples were taken from surface of 1 m² area, thawed at room temperature and filtered using medium fine filter paper. Snow particulate matter was extracted from filter paper to prepare powdered samples. Powdered samples of both materials were sputter-coated with gold and polished sections were coated with carbon. Samples were analyzed in high vacuum using BSE mode on JEOL JSM 6490LV SEM coupled with Oxford INCA Energy EDS at accelerating voltage 20 kV

PLATE 2 – TABLE 2

- 1 Technogenic spherical particle of dendritically crystallized (Cr, Fe)-oxide
Tehnogeno sferično zrno dendritično kristaljenega (Cr, Fe)-oksida
- 2 Zircon crystal
Kristal cirkona
- 3 Monazite grain
Zrno monazita
- 4 Chalcopyrite (arrow) in pyroxene or amphibole (polished section)
Halkopirit (puščica) v piroksenu ali amfibolu (poliran obrus)
- 5 Xenotime (YPO₄) (arrow) in K-feldspar or biotite
Xenotim (YPO₄) (puščica) v K-glinencu ali biotitu
- 6 Carbonaceous hollow spherical particle (low-temperature domestic combustion product)
Ogljikov votli sferični delec (nizkotemperaturna hišna kurišča)
- 7 Spherical particle of Ca-ferrite (high-temperature industrial coal combustion product)
Sferični delec Ca-ferita (visokotemperaturni industrijski sežig premoga)
- 8 Heavy metal-bearing spherical particle of (Cr, Ni)-oxide (high-temperature iron and steel melting processes)
Sferični delec s težkimi kovinami, (Cr, Ni)-oksid (visokotemperaturno taljenje jekla in železa)
- 9 Irregularly shaped particle, interpreted as coal residue (coke)
Delec nepravilnih oblik, domnevno nezgoreni ostanek premoga (koks)

PLATE 2 – TABLE 2



and working distance 10 mm. Mineral phases of heavy metals were assessed from atomic proportions of constituent elements, obtained by semi-quantitative X-ray microanalysis.

Results and discussion

Stream sediments in Mežica mining area

The environs of Mežica are strongly polluted with lead, zinc, arsenic, cadmium and molybdenum. Previous investigations of heavy metal pollution in the Meža valley have shown that the environment in the upper Meža valley is highly polluted (KUGONIČ & ŽUPAN, 1999; VREČA et al., 2001; BOLE et al., 2002; ŠAJN, 2006; FUX & GOSAR, 2007). ŠAJN (2006) demonstrated the spatial distribution of heavy metals in soil and based on the factor analysis he determined two natural geochemical associations that are a consequence of natural bedrock weathering, and two anthropogenic geochemical associations that are a consequence of mining/smelting and ironworks activities were determined in the Meža valley. Detailed analyses of stream sediments of the Meža River and its tributaries were carried out by BOLE and co-authors (2002) and FUX and GOSAR (2007) who found out that, although the mining and metallurgical facilities have ceased to operate, their influence on stream sediments is still significant, due to washing out of heavy metal-contaminated material from mining and ore processing waste deposits into streams.

In the Meža valley we focused on identifying heavy metal-bearing phases in heavily polluted environmental media of Mežica mining district, characterising them according to their source and genesis and thus ascertain the degree of negative impacts arising from Pb-Zn mining and smelting activities in the Mežica mining district and ironworks in Ravne area. Source apportionment and genesis of heavy metal-bearing phases in environmental media were carried out on basis of particle morphology and their elemental composition, greatly assisted by comparison with material from source areas (source material). Chemical composition of geogenic heavy metal-bearing mineral phases is relatively simple compared to technogenic phases that possess complex chemical composition (ARAGON et al., 2000).

Samples of stream sediments, taken from the most polluted areas of the Meža Valley were analyzed using SEM/EDS. Detected heavy metals are Pb, Zn, Cr, Ni, Mn, Mo, Cd, Ti, V, W, Zr, Ce, Sb, Cu, Y, Sr, Ba and Ag, which appear in forms of different heavy metal-bearing phases.

In sediments of **the Mežica mining and smelting area**, mineral phases such as cerussite (PbCO_3) (Pl. 1, Fig. 1), galena (PbS) (Pl. 1, Fig. 2), sphalerite (ZnS) (Pl. 1, Fig. 3), smithsonite (ZnCO_3) (Pl. 1, Fig. 4), descloizite ($\text{PbZn(VO}_4\text{)(OH)}$) (Pl. 1, Fig. 5), bindheimite ($\text{Pb}_2\text{Sb}_2\text{O}_6\text{(O, OH)}$) (Pl. 1, Fig. 6) and pyromorphite ($\text{Pb}_5\text{(PO}_4\text{)}_3\text{Cl}$) were identified. Their sources are geogenic and technogenic processes in the Mežica mining district.

Technogenic phases, such as various Fe-alloys ((Cr, Ni)-ferroalloy, (Cu, Ni)-alloy (Pl. 1, Fig. 7) and (Fe, Si)-alloy (Pl. 1, Fig. 8)), Fe-oxides ((Cr, V, Fe)-oxide, (Mo, W, V, Cr, Fe)-oxide (Pl. 1, Fig. 9), (Mo, W)-oxide, (W, Cr, Fe)-oxide (Pl. 1, Fig. 9)) and spherical particles ((Cr, Ni)-oxide-chrome-nickel-spinel, (Cr, Fe)-oxide-ferrochrome-spinel (NEINAVAIE et al., 2000) (Pl. 2, Fig. 1)), were recognized **in the area of Ravne ironworks**.

Mineral phases of geogenic origin that were found in most of the investigated sediments in upper and lower Meža Valley are zircon (ZrSiO_4) (Pl. 2, Fig. 2), rutile (TiO_2), ilmenite (FeTiO_3), barite (BaSO_4), monazite ((Ce, La, Nd) PO_4) (Pl. 2, Fig. 3), sphene (CaTiSiO_5), chalcopyrite (CuFeS_2) (Pl. 2, Fig. 4), xenotime (YPO_4) (Pl. 2, Fig. 5) and strontianite (SrCO_3). Most of geogenic mineral phases are common rock forming minerals, composing metamorphic, igneous and carbonate bedrock of the Meža River and tributary catchment areas. Their source is most probably weathering of bedrock in the catchment areas of the Meža River and its tributaries, which is indicated by associations of common rock-forming minerals in stream sediments and the fact that they are present in all samples, independently of sampling location.

Snow deposit in Ljubljana urban area

Preliminary analyses using SEM/EDS enabled characterisation and source apportionment of airborne particles deposited in snow. Geogenic and technogenic sources of those particles were determined according to their morphology and elemental composition.

Particles of geogenic origin are represented by fragments of heavy metal-bearing mineral phases, mostly as zircon, barite, pyrite and other rock-forming minerals.

Most of technogenic particles originate presumably from combustion processes and road traffic emissions (NEINAVAIE et al., 2000). Very porous hollow spherical particles (Pl. 2, Fig. 6) and irregularly shaped soot particles, composed mainly of C and S and partly Ca and Fe, were interpreted as low-temperature domestic combustion products (domestic furnaces). Calcium and iron containing spherically shaped particles, designated as Ca-ferrites (Pl. 2, Fig. 7), and Ca, Al and Si containing spherical particles, designated as (Ca, Al)-silicates, presumably emanate from high-temperature industrial coal combustion (coal-burning power plants). Spherically shaped heavy metal-bearing particles containing Cr, Ni and Fe probably originate from high-temperature iron and steel melting processes (ironworks, steelworks). Such particles were interpreted as (Cr, Ni)-oxides-chrome-nickel spinels (Pl. 2, Fig. 8), (Cr, Fe)-oxides-ferrochrome spinels and (Ca, Fe)-silicates. Road traffic particles are generally represented by irregular particles that were interpreted as exhaust soot, tyre fragments, containing C, S, Ca and Fe, and steel fragments, consisting of Cr, Fe and small amounts of Ti. Irregularly shaped particles, interpreted as coal residue (coke) (Pl. 2, Fig. 9), were also found.

Conclusions

A combination of SEM and EDS proved to be a very useful analytical method for the study of heavy metal-bearing phases and characterisation according to their sources and genesis. Results of our SEM/EDS analyses of environmental media agree well with data obtained by conventional geochemical methods and provide supplemental information on species, morphology, sources and genesis of geogenic and anthropogenic heavy metal-bearing phases. Knowledge of mineralogy of heavy metal-bearing phases, obtained by SEM/EDS analysis, is important in understanding their stability, solubility, mobility, bioavailability, toxicity and developing remediation strategies.

Source apportionment and genesis of heavy metal-bearing phases in environmental media is greatly assisted by particle morphology, their elemental composition and comparison with source material. However, some of frequently occurring heavy metal-bearing mineral phases are difficult to distinguish from one another due to peak overlaps of X-ray spectral lines and limited resolution of the EDS. Such heavy metal-bearing mineral phases are Pb-sulfides and Pb-molybdates. SEM/EDS also enables detection of heavy metals that represent major components of rarely occurring mineral phases in the sample. However, determination of heavy metals that represent trace elements in frequently occurring mineral phases is difficult and depends on their content.

Acknowledgements

Presented study was carried out in the frame of the research programme Groundwaters and geochemistry at Geological Survey of Slovenia. The authors would like to thank to the Slovenian Research Agency (ARRS) for financial support. We also thank to Dr. Hassan Neina-vaie from Geological Survey of Austria (GBA) for useful suggestions and help with interpretation of SEM/EDS data.

References

- ADRIANO, D. C. 1986: Trace elements in the terrestrial environment. Springer-Verlag (New York, Berlin, Heidelberg, Tokyo): 1–533.
- ALBARDE, F. 2003: Geochemistry. Cambridge University Press (Cambridge): 1–248.
- ARAGON, A. P., TORRES, G. V., MONROY, M. F., LUSZCZEWSKI, A. K. & LEYVA, R. R. 2000: Scanning electron microscope and statistical analysis of suspended heavy metal particles in San Luis Potosi, Mexico. *Atmospheric Environment* 34: 4103–4112.
- BERNAUS, A., GAONA, X. & VALIENTE, M. 2005: Characterization of Almaden mercury mine environment by XAS techniques. *J. Environ. Monit.* 7: 771–777.
- BOLE, M., DRUKS, P., ROŠER-DREV, A. & VETRIH, M. 2002: Meža s pritoki – sediment, segment vode. In: RIBARIČ LASNIK C.: Primerjalna študija o onesnaženosti okolja v Zg. Mežiški dolini med stanji v letih 1989 in 2001. Final report: 106–125.
- DUDKA, S. & ADRIANO, D. C. 1997: Environmental impacts of Metal Ore Mining and processing: A Review. *Journal of Environmental Quality* 2: 590–602.
- FUX, J. & GOSAR, M. 2007: Vsebnosti svinca in drugih težkih kovin v sedimentih na območju Mežiške doline (Lead and other heavy metals in stream sediments in the area of Meža valley). *Geologija (Ljubljana)* 50/2: 347–360.
- GOLDSTEIN, J., NEWBURY, D., JOY, D., LYMAN, C., ECHLIN, P., LIFSHIN, E., SAWYER, L. & MICHAEL, J. R. 2003: Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis, 3rd edition. Kluwer Academic/Plenum Publishers (New York): 1–689.
- GREIČIŪTĒ K., JUOZULYNAS A., ŠURKIENĒ G., & VALEIKIENĒ, V. 2007: Research on soil disturbance and pollution with heavy metals in military grounds. *Geologija (Ljubljana)* 57: 14–20.
- HOCHELLA JR, M., F., MOORE, J. N., PUTNIS, C. V., PUTNIS, A., KASAMA, T. & EBERL, D. D. 2005: Direct observation of heavy metal-mineral association from the Clark Fork River Superfund Complex: Implications for metal transport and bioavailability. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 7/69: 1651–1663.
- HOSKIN, W., BIRD, G. & STANLEY, T. 2000: Mining – facts, figures and environment. *Industry and environment* 23: 4–8.
- HUDSON-EDWARDS, K. A. 2003: Sources, mineralogy, chemistry and fate of heavy metal-bearing particles in mining-affected river systems. *Mineral. Mag.* 67: 205–217.
- IDZELIS, R., GREIČIŪTĒ, K. & DAINIUS, L. P. 2006: Investigation and evaluation of surface water pollution with heavy metals and oil products in kairiai military ground territory. *Journal of Environmental Engineering & Landscape Management* 14/4: 183–190.
- JEONG, J. & MCDOWELL, S. D. 2003: Characterization and Transport of Contaminated Sediments in the Southern Central Lake Superior. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering* 2/2: 111–135.
- JORDAN, G. 2009: Sustainable mineral resources management: from regional mineral resources exploration to spatial contamination risk assessment of mining. *Environ. Geol.*, on line first: 17 pp.
- KEMPAINEN, S., TERVAHATTU, H. & KIKUCHI, R. 2003: Distribution of airborne particles from multi-emission source. *Environmental Monitoring and Assessment* 85: 99–113.
- KUGONIČ, N. & ZUPAN, M. 1999: Vsebnosti Pb, Cd in Zn v tleh in nekaterih rastlinah v Zgornji mežiški dolini. In: RIBARIČ-LASNIK C. et al. (eds): Problem težkih kovin v Zgornji Mežiški dolini: proceedings volume, Environmental Research & Industrial Co-operation Institute ERICo (Velenje): 66–78.
- NAVARRO, A., BIESTER, H., MENDOZA, J. L. & CARDSELLACH, E. 2006: Mercury speciation and mobilization in contaminated soils of the Valle del

- Azogue Hg mine (SE, Spain). *Environ. Geol.* 49: 1089–1101.
- NEINAVAIE, H., PIRKL, H. & TRIMBACHER, C. 2000: Herkunft und Charakteristik von Stäuben: Research report. Umweltbundesamt (Wien): 1–61.
- OTTESEN, R. T., BOGEN, J., BØLVIKEN, B. & VOLDEN, T. 1989: Overbank sediment: a representative sample medium for regional geochemical mapping. *J. Geochem. Explor.* 32: 257–277.
- PIRC, S. & BUDKOVIČ, T. 1996: Remains of World War 1 geochemical pollution in the landscape. In: RICHARDSON, M. (ed.): *Environmental xenobiotics*. Taylor & Francis (London): 375–418.
- SAMARDŽIJA, Z. 2004: Osnove metod SEM in AFM za preiskave površin. *Vakuumist (Ljubljana)* 24/1–2: 4–12.
- SCHÖNER, W., PUXBAUM, H., STAUDINGER, M., MAUPETIT, F. & WAGENBACH, D. 1997: Spatial variability in the Chemical Composition of the Snowcover at High Alpine Sites. *Theor. Appl. Climatol.* 56: 25–32.
- SIEGEL, F. R. 2002: *Environmental Geochemistry of Potentially Toxic Metals*. Springer – Verlag (Berlin, Heidelberg): 1–218.
- ŠAJN, R. 2006: Factor Analysis of Soil and Attic-dust to Separate Mining and Metallurgy Influence, Meža Valley, Slovenia. *Mathematical Geology* 38/6: 735–747.
- TRIMBACHER, C. & WEISS, P. 1999: Needle surface characteristics and element contents of Norway spruce in relation to the distance of emission sources. *Environmental Pollution* 105: 111–119.
- TRIMBACHER, C. & WEISS, P. 2004: Norway spruce: A novel method using surface characteristics and heavy metal concentrations of needles for a large-scale monitoring survey in Austria. *Water, Air and Soil Pollution* 152: 363–386.
- VANEK, A., ETTLER, V., GRYGAR, T., BORUVKA, L., ŠEBEK, O. & DRABEK, O. 2008: Combined chemical and mineralogical evidence for heavy metal binding in mining- and smelting-affected alluvial soils. *Pedosphere* 18/4: 464–478.
- VREČA, P., PIRC, S. & ŠAJN, R. 2001: Natural and anthropogenic influences on geochemistry of soils in barren and mineralized carbonate terrains. *Journal of Geochemical Exploration* 74: 99–108.
- ZHOU, W., APKARIAN, R. P., WANG, Z. L. & JOY, D. 2006: *Fundamentals of Scanning Electron Microscopy*. In: Zhou, W. & Wang, Z. L. (eds.): *Scanning Microscopy for Nanotechnology, Techniques and Applications*. Springer (New York): 1–40.

Preliminary results of detailed geochemical study of mercury at the ancient ore roasting site Pšenk (Idrija area, Slovenia)

Preliminarni rezultati geokemične raziskave živega srebra na območju nekdanje žgalnice rude Pšenk (Idrijsko, Slovenija)

Tamara TERŠIČ & Mateja GOSAR

Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, SI-1000 Ljubljana, Slovenia
e-mail: tamara.tersic@geo-zs.si; mateja.gosar@geo-zs.si

Prejeto / Received 13. 4. 2009; Sprejeto / Accepted 5. 5. 2009

Key words: geochemistry, mercury, ore roasting, Pšenk, Idrija, Slovenia
Ključne besede: geokemija, živo srebro, žgalnice, Pšenk, Idrija, Slovenija

Abstract

Pšenk is one out of 21 localities of ancient roasting sites in the woods surrounding Idrija and one of the largest localities of roasting vessels fragments. The most abundant pottery remains are found in the central western part of the area, which is about 60 m long and up to 50 m wide and is supposed to be the location of the roasting process itself. Detailed soil sampling was performed on 210 x 180 m big area. 156 soil (0–15 cm and 15–30 cm) and humus samples were collected from 73 sampling points. 3 soil profiles were sampled to determine vertical distribution of Hg in soil. The prevailing soil types are Cambisols with the typical A–B–C layers sequence. In general soils are rich in organic matter to the depth of 30–40 cm; deeper the clayey loam prevails. The determined Hg contents in soil and humus samples of the investigated area are in the range 1.6–8,600 mg/kg with the median of 62.5 mg/kg. At the area of supposed roasting site the Hg contents range between 20 and 8,600 mg/kg with the median of 580 mg/kg. Spatial distribution of mercury in humus and soils of the investigated area show the highest Hg concentrations at the supposed roasting site area where the largest quantity of pottery fragments were found and to the east of this area, at the narrow tract between the footpath on the north and the bed of Lačna voda brook on the south. Extremely high Hg contents were found in profile P4 where it reaches 37,020 mg/kg at the depth of 20–30 cm; in general Hg concentrations in all three studied profiles show a gradual decrease with depth. The soils of the investigated area are enriched with mercury to a high degree. Further investigations on Hg speciation are needed to determine the mobility and bioavailability of Hg in soil.

Izvleček

Pšenk je ena izmed 21 lokacij nekdanjih žgalniških mest v gozdovih okrog Idrije in eno večjih nahajališč drobirja žgalniških posod. Največje količine lončenine najdemo na približno 60 m dolgem in do 50 m širokem predelu v centralnem zahodnem delu obravnavanega območja, ki domnevno predstavlja ožje območje žgalnice. Na raziskovanem ozemlju v velikosti 210 x 180 m je bilo na 73 vzorčnih lokacijah odvzetih 156 vzorcev tal (0–15 cm and 15–30 cm) in humusa. Za določitev vertikalne razporeditve Hg v tleh so bili vzorčeni 3 talni profili. Prevladujoči talni tip so kambična tla s tipičnim profilom A–B–C. Tla so v splošnem bogata z organsko snovjo do globine 30–40 cm, globlje pa prevladuje glinasta ilovica. Vsebnost živega srebra v obravnavanih vzorčnih medijih znaša v povprečju 62,5 mg/kg in niha v razponu od 1,6 do 8.600 mg/kg. Na ožjem območju žgalnice se vrednosti gibljejo med 20 in 8.600 mg/kg, mediana znaša 580 mg/kg. Prostorska razporeditev živega srebra v humusu in tleh kaže najvišje vrednosti na domnevnem ožjem območju žgalnice in vzhodno od tega območja, na predelu med gozdno potjo na severu in strugo potoka Lačna voda na vzhodu. Ekstremno visoke vsebnosti Hg so bile določene v profilu P4, kjer dosežejo na globini 20–30 cm vrednost 37.020 mg/kg; v splošnem vsebnosti Hg v vseh treh obravnavanih profilih postopoma upadajo z globino. Tla na obravnavanem območju so močno obogatena z živim srebrom, zato so potrebne nadaljnje raziskave vrstni živega srebra, ki bodo omogočile določitev mobilnosti in bio-dostopnosti živega srebra v tleh.

Introduction

Numerous extensive and detailed investigations on mercury pollution were performed in Idrija region in the last decades (GNAMUŠ, 1992, 2002; HESS, 1993; PALINKAŠ et al., 1995; GOSAR, 1997,

2008; GOSAR et al., 1997, 2006; BIESTER et al., 1999, 2000; HORVAT et al., 2003; GNAMUŠ et al., 2000; GOSAR & ŠAJN, 2001, 2003; KOČMAN et al., 2004; GOSAR & ČAR, 2006; HINES et al., 2006; ŽIBRET & GOSAR, 2006). Owing to naturally increased mercury contents in certain rocks, mining and ore processing,

Idrija and its surroundings are heavily polluted with Hg. Most studies on the environmental legacy of the Hg mining activity in Idrija has focused on soils in the vicinity of the smelter in Idrija or on the draining systems of the Idrijca river, including the Gulf of Trieste, which is seen as the major sink of Hg derived from the mining activity in Idrija. Systematic investigations of mercury contents and its spatial distribution in soil (HESS, 1993; GOSAR & ŠAJN, 2001, 2003; GOSAR et al., 2006) demonstrate very high mercury contents in the Idrijca River valley near the pollution source, i.e. smokestack, while lower values prevail at higher elevations and tend to decrease with the distance from Idrija. Until recently, most interpretations of the investigations resulted from the belief that the town of Idrija with the mine, the smelter and waste material dumps, is the only source of pollution. The detailed study on different ways of ore roasting techniques in the first 150 years of mercury production (ČAR & TERPIN, 2005; KAVČIČ, 2008), revealed numerous localities of historical ore roasting sites in the woods around Idrija; large quantities of broken pottery can be found at these sites. Up to now 21 localities of ancient roasting sites were established on the neighbouring hills and in more distant localities; taking into account their extent and numerousness they represent a constant source of mercury emissions (ČAR & TERPIN, 2005; GOSAR & ČAR, 2006). In certain studies several anomalies were discovered in soils (HESS, 1993; GOSAR & ŠAJN, 2001) and sediments (GOSAR, 2008) where increased mercury contents cannot be the consequence of main Hg sources such as atmospheric emissions, mineralized rock dumps and smelting residues or their use in construction. These unexplained mercury anomalies could most likely be the consequence of ancient ore roasting in the woods around Idrija.

Despite the fact that they are known, small roasting sites from the early times (16th and first half of 17th century) of mining activity have been neglected as an important source of Hg pollution of soils and groundwater in the Idrija area. In general, the long term fate of Hg in the soils polluted by the Hg mining activity in Idrija is not sufficiently understood. Among the studies that have focused on soil contamination, none has yet dealt with the former old ore-roasting sites located mainly in the forests, more or less distant from the ore deposit. Studies of these interesting locations have been so far restricted above all to the collection and interpretation of historical data, the assessment of roasting site locations and the reconstruction of ore roasting in earthen vessels. The preliminary investigation of mercury contents in soils at old roasting site locations revealed that mercury contents in soils at these sites are very high, surpassing all hitherto described localities at Idrija and surroundings. It is estimated that there are about 40 tons of mercury still present at all roasting sites in the woods described up to now (GOSAR & ČAR, 2006). Moreover, it is not known to what extent and how distant Hg from these comparatively primitive ore processing si-

tes had been dispersed by emissions of Hg(0) to the soils in vicinity of those sites.

This study is the continuation of the before mentioned preliminary geochemical investigation in the areas of ancient small scale mercury ore roasting sites in Idrija environments (GOSAR & ČAR, 2006). The research aims result from the unique situation of the historical contaminated sites, which allows new insight into the long term fate of mercury and its species in the waste dumps and soil environment. The objectives of this work are to define the extension of mercury pollution at old roasting sites and their significance for mercury dispersion locally and also in the wider Idrija area, to determine the contents and vertical distribution of mercury in soils and sediments and to establish the changes in mercury speciation with depth in the soil profile. In this paper some preliminary results from old roasting site Pšenk are presented.

Procedure of ore roasting in earthen vessels

In the first decade of mercury mining in Idrija the ore was roasted in piles. This was the most primitive method of extracting mercury and was employed for only a short period of time, from 1490 until 1510. The recovery rate of this method was very low and about half of the mercury was lost. For this reason, a new procedure, roasting of ore in earthen (clay) vessels was introduced in 1494; the ore roasting in this manner was performed at various sites in the woods around Idrija and it lasted for approximately 150 years, until 1656. The reason why this procedure was used for such a long time period lies in very rich mercury ore, which was discovered in 1508 and probably contained on average about 50 % of Hg. The richest excavated ore could contain up to a few percent of elemental Hg. The ore was transported to roasting sites which, due to felling large quantities of trees, were being set up at increasingly greater distances from mine pits. In this procedure, 1.5 kg of rich ore mixed with quicklime was placed in small clay vessels; the vessels were stopped with moss, placed neck downwards onto a receptacle, and their contacts smudged with clay. About 1000 vessels prepared in this way were placed on a piece of treaden ground encircled with stones, covered with sand or ash up to a height of 10 cm above the contact of lower and upper vessels, stacked with wood and ignited. As it grew hotter, the mercury evaporated from the upper vessel and accumulated in the lower, cooler vessel. After one day of burning and several days of cooling, the vessels were separated and the mercury was collected from the bottom vessel (KAVČIČ, 2008). As well as roasting in piles also roasting in earthen vessels gave a very poor yield and resulted in considerable losses. Because of the high temperatures usually a third of earthen vessels cracked during burning and mercury escaped from the vessels (VERBIČ, 1965). Large quantities of broken pottery can be found at an-

cient roasting sites, especially at localities Pšenk and Frbežene trate.

Materials and methods

Site description

Pšenk is one of the larger localities of roasting vessels fragments. Its position is represented on Figure 1. Roasting site Pšenk was discovered already in the beginning of 20th century during cutting down old spruce-trees (GRUND, 1911). It is located on flattened surface at Lačna voda brook below Hleviše, above its confluence with the Padar ravine. The flattened surface is the result of the thrust along which the Triassic dolomite is thrust over the Cretaceous limestone. The dolomite is covered with stained quartz conglomerate and sandstone of the Carnian age (ČAR & TERPIN, 2005). The most abundant pottery remains are found in the central western part of the area, just below the way to Hleviše. This area is about 60 m long and up to 50 m wide and is supposed to be the location of the roasting process itself. The pottery fragments lay just below the surface humus layer and in some parts they stretch more than 1 meter deep. Single parts of pottery fragments can be found along the whole gravelly bed of Lačna voda brook.

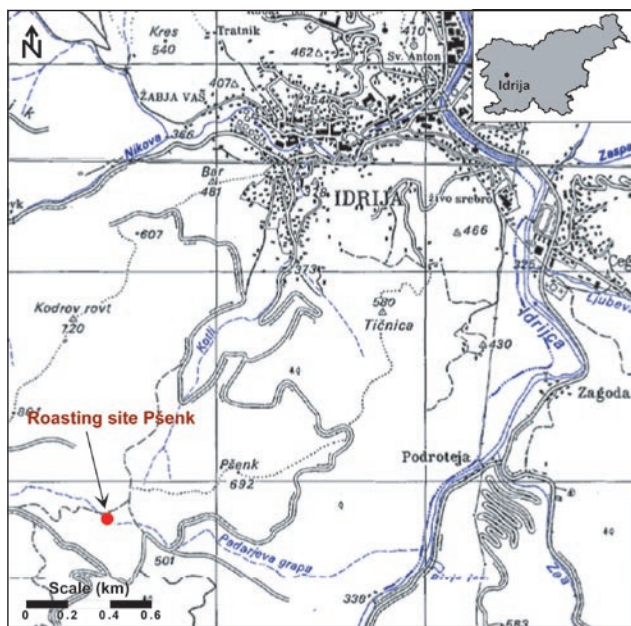


Fig. 1. Locality of ancient roasting site Pšenk

Sampling

Detailed soil sampling was performed on the area of former roasting site and its surroundings, on approximately 210 x 180 m big area (Fig. 2). Soil (0–15 cm) and humus samples were collected from 73 sampling points in the research grid 30 x 30 m. At the area of supposed past roasting processes (approximately 40 x 50 m big area) the sampling was performed in the research grid 10 x 10 m (22 sampling locations) and beside humus and topsoil (0–15 cm) also bottom soil (15–30 cm) samples were collected here. Approximately 1 kg

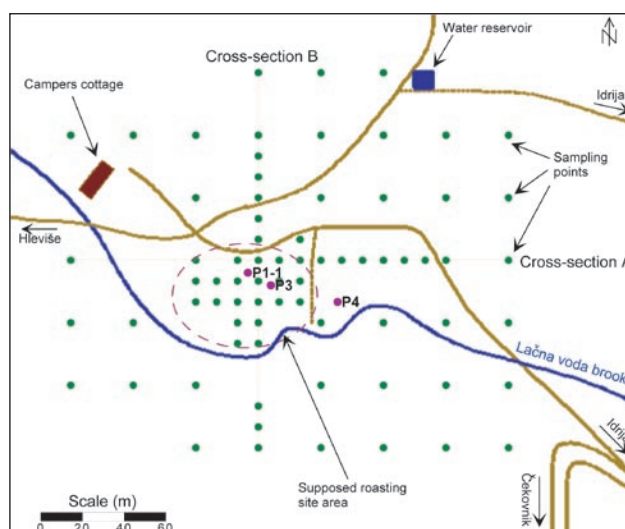


Fig. 2. Pšenk roasting site area with sampling locations

of soil and 0.5 kg of humus was collected at each sampling site. To determine vertical distribution of Hg in soil also 3 soil profiles were sampled. The P1-1 profile was taken by digging a ditch of about 35 cm in depth; afterwards it was taken by a hand-drilling tool to a depth of 95 cm. The P1-1 profile was sampled next to the locality of geochemical profile P1, described in the study of GOSAR & ČAR (2006). Profile P3 was sampled by a hand-drilling tool to 50 cm. Profile P4 was taken by digging a ditch of approximately 50 cm in depth. Samples were then cut from the soil column using a plastic spatula with regard to visible differences of soil characteristics (colour, consistency). Samples were taken on each 20 cm with a hand-drilling tool. The prevailing soil types are Cambisols with the typical A–B–C layers sequence. In general soils are rich in organic matter to the depth of 30–40 cm; deeper the clayey loam prevails. Soil characteristics are shown in Table 2. All soil and humus samples were stored in polyethylene bags at ambient temperature (15–25 °C) before further treatment in the laboratory.

Sampling preparation and analytical methods

The soil samples were air-dried and gently crushed in a ceramic mortar and passed through a sieve with 2 mm openings. Fraction smaller than 2 mm was pulverized prior to chemical analysis. Hg was determined by cold vapour atomic absorption spectrometry (CV-AAS) after digestion of the sample material in aqua regia for 3 h at 160 °C. Samples with very high Hg concentrations (>100 mg/kg) were analyzed at the Institute for Environmental Geochemistry at Technical University Braunschweig. To determine total mercury, 0.10 g of soil samples was digested with a mixture of HNO₃ and HCl at a ratio 1:3, left to react for 24 hours at room temperature and after that for 1 hour at 160 °C. The mixture was then filtered through folded filter (Ø 185 mm) and diluted with ionized water to 100 ml. Then the sample was reduced with stannous chloride (SnCl₂) to convert Hg²⁺ to gaseous mercury (Hg⁰) and then detected using mercury analyzer.

Quality assurance was carried out by shipment of samples, duplicates and geological standards to the laboratory in a random succession to distribute evenly any errors due to laboratory performance. Objectivity was assured through the use of neutral laboratory numbers. The reliability of analytical procedures was considered adequate for using the determined Hg contents in further statistical analyses.

Data analysis and production of maps were performed on a PC using the Statistica (ver. 6.1), Autocad (ver. 2000) and Surfer (ver. 8.0) software. The universal kriging with linear variogram interpolation method (DAVIS, 1986) was applied to construct the maps of areal distribution of Hg in humus and soil (0–15 cm). For class limits the percentile values of the Hg distribution in investigated samples were chosen. Five classes of the following percentile values were selected: 0–10, 10–25, 25–75, 75–90 and 90–100.

Results and discussion

The Hg contents in soil and humus samples of the investigated area are in the range 1.6–8,600 mg/kg ($N=156$) with the median of 62.5 mg/kg. The Hg median in humus samples ($N=67$) amounts to 20.0 mg/kg with individual contents ranging between 1.4 and 4,200 mg/kg. Hg concentrations in soil ($N=73$) vary from minimum 5.5 to maximum 8,600 mg/kg with the median of 70.0 mg/kg. At the area of roasting site itself the Hg contents range between 20 and 8,600 mg/kg with the median of 580 mg/kg ($N=58$). The median in humus samples is 435 mg/kg (20–2,100 mg/kg; $N=20$), in topsoil 695 mg/kg (60–8,600 mg/kg; $N=22$) and in subsoil 535 mg/kg (50–7,900 mg/kg; $N=16$). Table 1 summarizes the determined Hg values in humus and soil samples of the investigated area.

The determined Hg values in the investigated area are extremely high, surpassing all hitherto described localities at Idrija and surroundings. Compared to Hg average for Slovenian soils (0.065 mg/kg; ŠAJN, 2003), the studied soils from the investigated area are enriched in mercury by a

factor of 10^2 – 10^6 . The Slovenian critical value for Hg in soil (10 mg/kg; Ur. list RS 68/96 – Off. Gaz. RS 68/96) is exceeded on approximately 82 % of the investigated area. The highest Hg contents were determined in upper soil horizon (0–15 cm) and the lowest in humus samples. Compared to Hg contents in soils of Idrija area in the size of about 160 km² (GOSAR et al., 2006; Table 1), the determined Hg values of the investigated area are much higher. According to GOSAR et al. (2006) the studied area belongs to Area 2, which includes the area in the vicinity of the towns of Idrija and Spodnja Idrija and on the whole comprises 51 km². Compared to the established Hg median (3.2 mg/kg) and maximum (75 mg/kg) for this area, the Hg median in soils of the investigated area is 20-times higher and the maximum value is more than 100-times higher.

In profiles P1-1, P3 and P4 the determined Hg contents are very high, ranging from 140 to 37,020 mg/kg (Table 2, figs. 3 and 4). In profile P3 the contents decrease proportionally with depth, from 960 mg/kg in the top, with organic matter rich soil layer (0–20 cm) to 190 mg/kg in the bottom soil layer (40–50 cm). In profile P1-1 the Hg content increase from 1,880 mg/kg in the top soil horizon (0–15 cm) to 3,330 mg/kg at the depth of 15–35 cm; then the contents decrease with depth and reach 140 mg/kg at 75–95 cm. Compared to geochemical profile P1, described in the preliminary investigation in the areas of historical ore roasting sites (GOSAR & ČAR, 2006), the determined Hg contents in profile P1-1 have similar values and distribution. In P1 the established Hg contents were very high in the top 45 cm thick layer (4,000 to 5,000 mg/kg) and fall quite rapidly with depth to around 100 mg/kg at 60 cm. Extremely high Hg contents were found in profile P4 where it reaches 37,020 mg/kg at the depth of 20–30 cm. The value declines quite rapidly with depth and in depth range 30–50 cm only 1,080 mg/kg of mercury was found. In general Hg concentrations in all three studied profiles show a gradual decrease with depth which is in accordance with the decrease in organic matter content. This behaviour,

Area		Depth (cm)		Hg content (mg/kg)		
			N	Median	Min	Max
total investigated area		all samples	156	62.5	1.4	8,600
		humus	67	20	1.4	4,200
		soil 0–15 cm	73	70	5.5	8,600
roasting site area		all samples	58	580	20	8,600
		humus	20	435	20	2,100
		soil 0–15 cm	22	695	60	8,600
		soil 15–30 cm	16	535	50	7,900
Idrija*	Area 1		32	47	3.3	973
	Area 2	soil 0–15 cm	31	3.2	0.4	75
	Area 3		37	1.0	0.3	13
Europe**		subsoil >25 cm		0.022		
		topsoil 0–25 cm		0.037		
		humus		0.202		
Slovenia***		soil 0–5 cm		0.065		

Table 1. Mercury contents in humus and soils of the investigated area and comparison to mercury contents in soils of Idrija area, and to Slovenian and European averages of mercury in soil

*after GOSAR et al., 2006

**after SALMINEN et al., 2005

***after ŠAJN, 2003

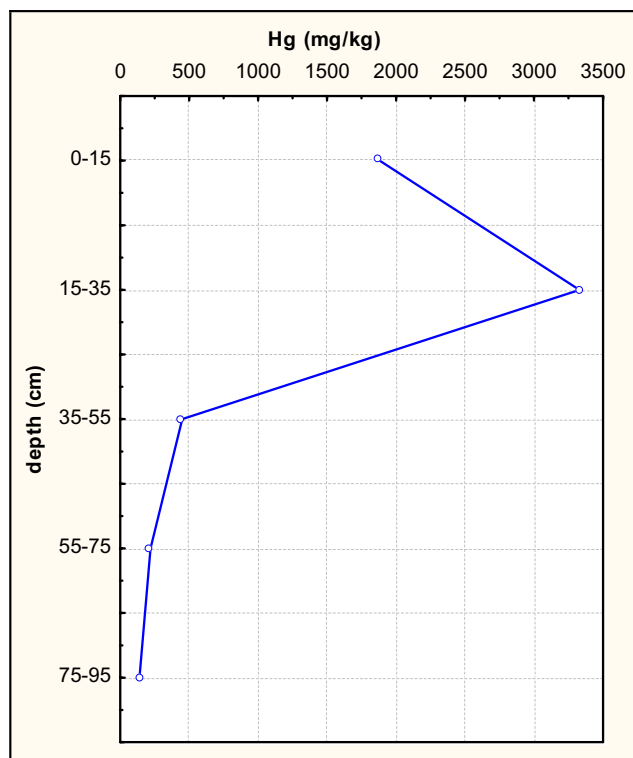


Fig. 3. Mercury contents in P1-1 profile

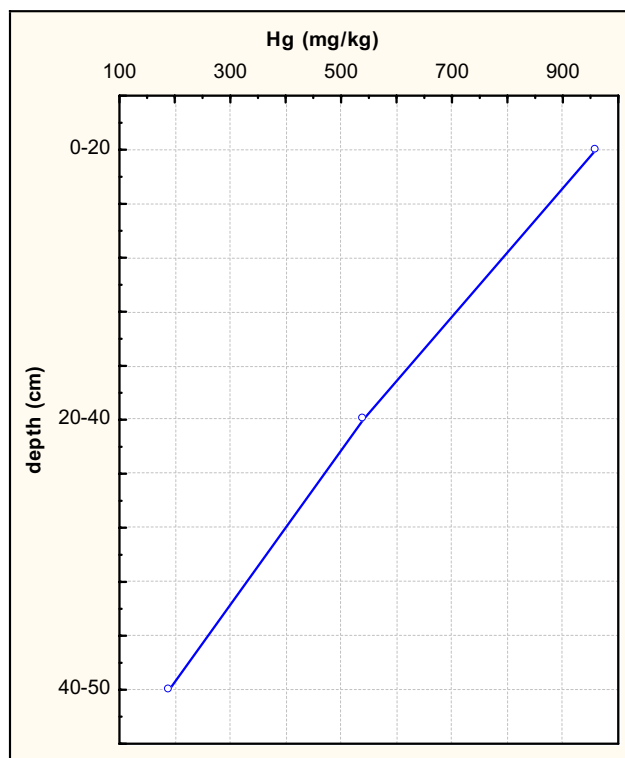


Fig. 4. Mercury contents in P3 profile

which was observed in several studies (BIESTER et al., 2002, PALMIERI et al., 2005) indicates that retention of Hg is strongly related to organic matter content, which is the highest in uppermost soil layer. However, the increase of Hg content from the topsoil layer to the highest value in the depth range from 15–35 cm in profile P1-1 and 20–30 cm in profile P3 could imply that adsorption of Hg to mineral soil components is as much or even more important than binding of Hg to organic matter content. The situation could also be the result of Hg transportation to deeper soil layers as soluble organic complexes. Nevertheless, to ascertain any of these assumptions, further analyses on mercury speciation and organic carbon content are in progress.

Spatial distribution of mercury in humus and soil of the investigated area (Figs. 5 and 6) show the highest Hg concentrations at the supposed roasting site area where the largest quantity of pottery fragments were found and to the east of this area, at the narrow tract between the footpath on the north and the bed of Lačna voda brook on the south. In humus the Hg contents decrease quite rapidly with the distance from this area and they reach the values of less than 10 mg/kg at the margins of the studied area. Hg distribution in soil shows a little larger region of highly contaminated area with slower decreasing of Hg concentrations to the margins of the studied area. High Hg contents (> 200 mg/kg) are continuing to the central western part and also to the north-eastern and

Profile	Depth (cm)	Soil characteristics	Hg (mg/kg)
P1-1	0–15	A horizon with pottery fragments	1,880
	15–35	organic matter rich soil; a lot of pottery fragments	3,330
	35–55	clayey loam	450
	55–75	loam with dolomitic fragments	220
	75–95	loam with a lot of dolomitic fragments from rock substrate	140
P3	0–20	A horizon	960
	20–40	organic matter rich soil mixed with clayey loam	540
	40–50	clay loam with sandstone fragments from rock substrate	190
P4	0–20	humic A horizon	13,845
	20–30	mixed layer (bituminous soil and clayey loam)	37,020
	30–50	clayey loam	1,080

Table 2. Mercury contents in profiles P1-1, P3 and P4

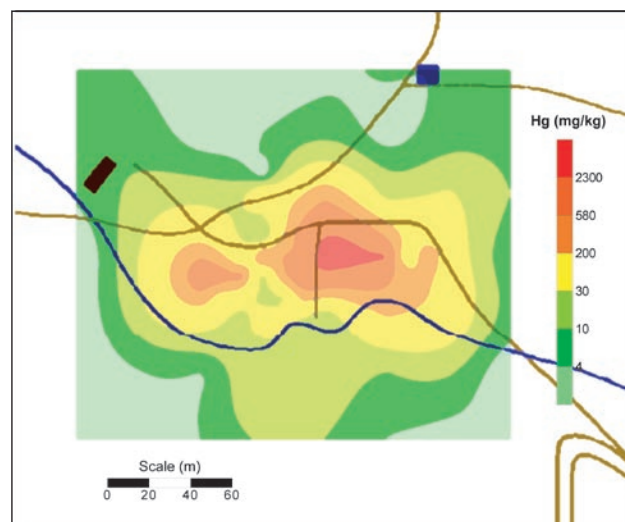


Fig. 5. Spatial distribution of mercury in humus (see Fig. 2 for orientation)

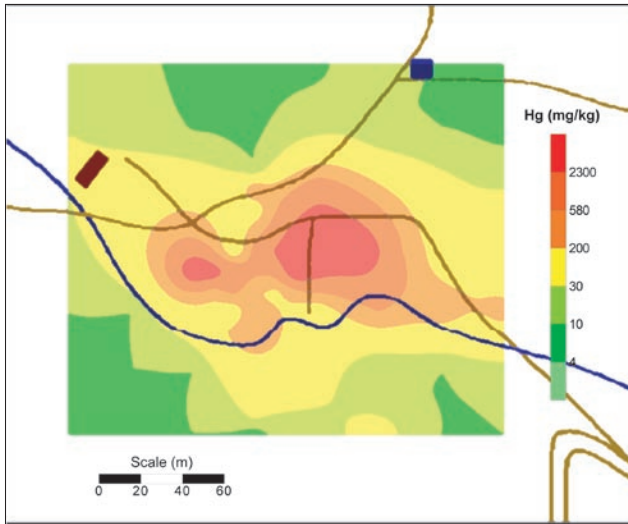


Fig. 6. Spatial distribution of mercury in soil (0–15 cm) (see Fig. 2 for orientation)

southern part of the investigated area where they are remaining in the range above 30 mg/kg. Hg distributions in cross-sections A and B show similar pattern (Figs. 7 and 8). The Hg contents in soil of cross-section A are very high, reaching up to 8,000 mg/kg Hg. The contents gradually increase

from the west towards the central part of the investigated profile with the maximum in the distance 130 m from the western point of sampling and then the contents gradually decrease to the east. Similar can be observed in cross-section B from the north to the east, though the pattern is not so regular and the Hg contents are much lower, with the maximum of about 900 mg/kg Hg. Very low Hg values in the northern part of cross-section B are the result of the elevated area in this region which means that the increased Hg concentrations here are probably only the consequence of smoke emissions during ore roasting and not of the roasting process itself. The main effects of the past roasting processes can be seen in increased Hg values in soils and humus in the narrow region between the footpath on the north and the Lačna voda brook on the south in the length of approximately 120 m and width about 50 m. Very high Hg concentrations in this area are presumably the consequence of considerable losses of Hg during the roasting process and many years of ore roasting at this site.

A major point regarding mercury in soils relates the chemical and/or mineralogical species present in them. Mercury deposited to soil is known to be subject to a wide array of chemical and biological transformation processes such as Hg(0) oxidation,

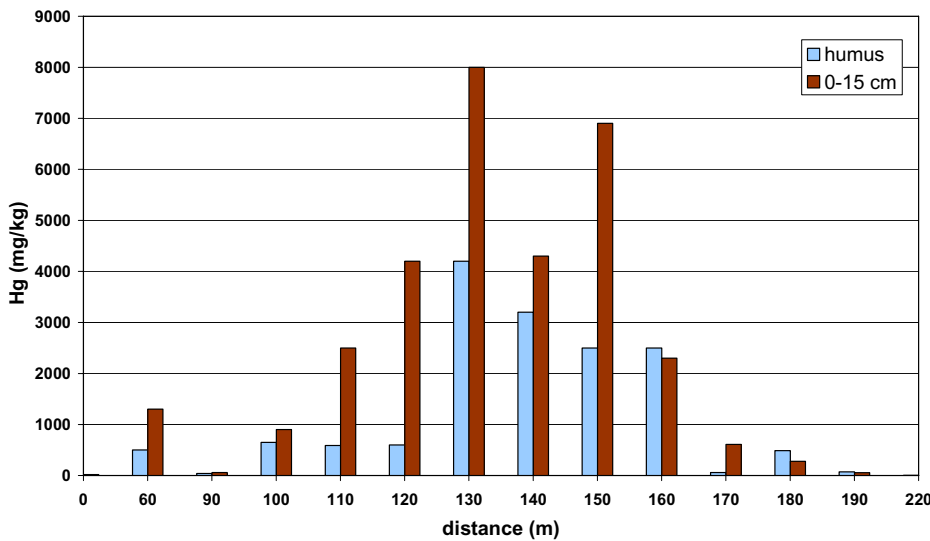


Fig. 7. Mercury contents in cross-section A (from the west on the left to the east on the right) *the position of the cross-section is shown on Fig. 2

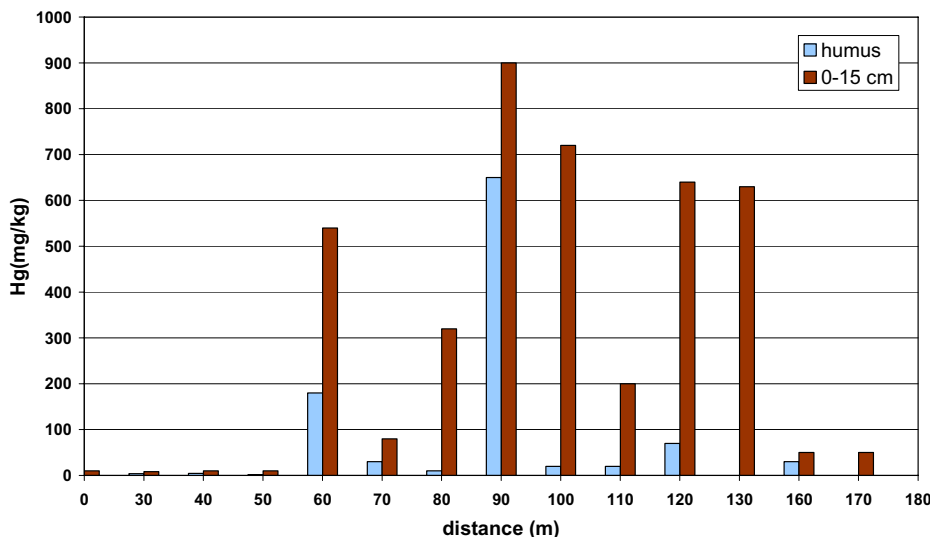


Fig. 8. Mercury contents in cross-section B (from the north on the left to the south on the right) *the position of the cross-section is shown on Fig. 2

and Hg(II) reduction or methylation depending on soil pH, temperature and soil humic substances. Hg mobilization in soils through formation of inorganic soluble Hg compounds such as HgCl_2 and $\text{Hg}(\text{OH})_2$, are of minor importance in the presence of organic matter as Hg is known to be effectively bound to soil humic substances. The formation of organic Hg(II) complexes is known to be the dominating process, which is due largely to the affinity of Hg(II) and its inorganic compounds to sulphur-containing functional groups (WEBER, 1988). Therefore mercury speciation analyses in the solid phase and in soil solution are going to be performed in the continuation of this study to determine Hg leachability, mobility, and bioavailability.

Conclusions

The study has shown that the ancient roasting site Pšenk and its surroundings are highly contaminated with Hg. The established median Hg content in soil and humus samples of the investigated area is 62.5 mg/kg (1.6–8,600 mg/kg). At the area of roasting site itself the median Hg content is 580 mg/kg with the individual contents ranging between 20 and 8600 mg/kg. The highest Hg values were found in topsoil (0–15 cm) of the roasting site alone, where the determined median is 695 mg/kg (60–8,600 mg/kg). Spatial distribution of mercury in humus and soil of the investigated area show the highest Hg concentrations at the supposed roasting site area where the largest quantity of pottery fragments were found and to the east of this area, at the narrow region between the footpath on the north and the bed of Lačna voda brook on the south in the length of approximately 120 m and width about 50 m. In humus the Hg contents decrease quite rapidly with the distance from this area, while Hg distribution in soil shows a little larger region of highly contaminated area with slower decreasing of Hg concentrations to the margins of the studied area. Extremely high Hg concentrations were found in profile P4 (37,020 mg/kg at the depth 20–30 cm). The value declines quite rapidly with depth and in depth range 30–50 cm the soil contains only 1,080 mg/kg of mercury. In general Hg concentrations in all three studied profiles show a gradual decrease with depth. It should be emphasized that despite the fact that more than 400 years has already passed since small-scale ore roasting in the woods surrounding Idrija, these sites are still extremely contaminated with mercury. In fact, no world literature reports such high mercury values in soils of the mining or industry regions.

Acknowledgments

The presented geochemical study is funded by Slovenian Research Agency (ARRS) in the frame of the research programme Groundwater and Geochemistry and the research project Environmental geochemistry of metal contaminated sites which are performed on the Geological Survey of Slovenia. Thanks are expressed to

prof. dr. Harald Biester from Technical University Braunschweig who enabled and co-operated in geochemical analyses.

References

- BIESTER, H., GOSAR, M. & MÜLLER, G. 1999: Mercury speciation in tailings of the Idrija mercury mine. *Jour. of Geochem. Explor.*, (Amsterdam) 65: 195–204.
- BIESTER, H., GOSAR, M. & COVELLI, S. 2000: Mercury speciation in sediments affected by dumped mining residues in the drainage area of the Idrija mercury mine, Slovenia. *Environ. Sci. Technol.*, (Washington) 34/16: 3330–3336.
- BIESTER, H., MÜLLER, G. & SCHOLER, H. F. 2002: Binding and mobility of mercury in soils contaminated by emissions from chlor-alkali plants. *Science of the Total Environment*, 284/1–3: 191–203.
- ČAR, J. & TERPIN, R. 2005: Stare žgalnice živosrebrove rude v okolici Idrije. *Idrijski razgledi*, (Idrija) 50/1: 80–105.
- DAVIS, J.C. 1986: *Statistics and data analysis in geology*. Wiley & Sons (New York), 1–651.
- GNAMUŠ, A. 1992: *Uporaba bioloških indikatorjev za spremljanje in ovrednotenje obremenjenosti kopenskih ekosistemov z živim srebrom*. B.Sc. thesis, University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Biology (Ljubljana), 1–160.
- GNAMUŠ, A. 2002: *Živo srebro v kopenski prehranski verigi – Indikatorski organizmi, privzem in kopičenje*. Institut Jožef Stefan (Ljubljana), 1–266.
- GNAMUŠ, A., BYRNE, A.R. & HORVAT, M. 2000: Mercury in the soil-plant-deer-predator food chain on a temperate forest in Slovenia. *Environ. Sci. Technol.*, 34/16: 3337–3345.
- GOSAR, M., ŠAJN, R. & BIESTER, H. 2006: Binding of mercury in soils and attic dust in the Idrija mercury mine area (Slovenia). *Science of the Total Environment*, 369/1–3: 150–162.
- GOSAR, M. 1997: *Živo srebro v sedimentih in zraku na ozemlju Idrije kot posledica orudenja in rudarjenja (Mercury in sediments and air as a reflection of Idrija mineralization and mining)*. Ph. D. Thesis. Faculty of Natural Sciences and Engineering, University of Ljubljana, (Ljubljana), 1–125.
- GOSAR, M. 2008: Mercury in river sediments, floodplains and plants growing thereon in drainage area of Idrija mine, Slovenia. *Pol. J. Environ. Stud.*, 17/2: 227–236.
- GOSAR, M. & ČAR, J. 2006: Vpliv žgalnic živosrebrove 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*). *Geologija* (Ljubljana), 49/1: 91–101.
- GOSAR, M., PIRC, S. & BIDOVEC, M. 1997: Mercury in the Idrija river sediments as a reflection of mining and smelting activities of the mercury mine Idrija. *Journal of Geochemical Exploration*, 58: 125–131.

- GOSAR, M. & ŠAJN, R. 2001: Mercury in soil and attic dust as a reflection of Idrija mining and mineralization (Slovenia) (*Živo srebro v tleh in podstrešnem prahu v Idriji in okolici kot posledica orudenja in rudarjenja*). *Geologija* (Ljubljana) 44/1: 137–159.
- GOSAR, M. & ŠAJN, R. 2003: Geochemical soil and attic dust survey in Idrija, Slovenia. *Journal de Physique*, 107: 561–564.
- GRUND, R. 1911: Geschichtliches aus Idria. *Berg und Hüttenwesen* (Wien), 59/34: 457–461.
- KAVČIČ, I. 2008: Živo srebro: zgodovina idrijskega žgalništva. Založba Bogataj, 1–352.
- HESS, A. 1993: Verteilung, Mobilität und Verfügbarkeit von Hg in Böden und Sedimenten am Beispiel zweier hochbelasteter Industriestandorte. *Heidelberger Geowissenschaftliche Abhandlungen*, (Heidelberg), 71: 1–171.
- HINES, M. E., FAGANELI, J., ADATTO, I. & HORVAT, M. 2006: Microbial mercury transformations in marine, estuarine and freshwater sediment downstream of the Idrija Mercury Mine, Slovenia. *Applied Geochemistry*, 21/11: 1924–1939.
- HORVAT, M., KONTIČ, B., OGRINC, N., JEREB, V., LOGAR, M., FAGANELI, J., RAJAR, R., ŠIRCA, A., PETKOVŠEK, G., ŽAGAR, D. & DIZDAREVIČ, T. 2003: Remediation of mercury polluted sites due to mining activities. *Crit. rev. anal. chem.*, (Philadelphia) 33: 291–296.
- KOCMAN, D., HORVAT, M. & KOTNIK, J. 2004: Mercury fractionation in contaminated soils from the Idrija mercury mine region. *Journal of Environmental Monitoring*, 6: 696–703.
- PALINKAŠ, L.A., PIRC, S., MIKO, S.F., DURN, G., NAMJESNIK, K. & KAPELJ, S. 1995: The Idrija mercury mine, Slovenia, a semi-millennium of continuous operation: an ecological impact. In: Richardson, M., ed., *Environmental toxicology assessment*. Taylor & Francis (London), 317–341.
- PALMIERI, H.E.L., HERMINIO, A., NALINI, JR., LEONEL, L.V., WINDMÖLLER, C.C., SANTOS, R.C., DE BRITO, W. 2005: Quantification and speciation of mercury in soils from Tripui Ecological Station, Minas Gerais, Brazil. *Science of the Total Environment*, 368: 69–78.
- SALMINEN, R., BATISTA, M.J., BIDOVEC, M., DEMETRIADES, A., DE VIVO, B., DE VOS, W., DURIS, M., GILUCIS, A., GREGORUSKIENE, V., HALAMIC, J., HEITZMANN, P., JORDAN, G., KLAVER, G., KLEIN, P., LIS, J., LOCUTURA, J., MARSINA, K., MAZREKU, A., O'CONNOR, P. J., OLSSON, S.Å., OTTESEN, R.-T., PETERSELL, V., PLANT, J.A., REEDER, S., SALPETEUR, I., SANDSTRÖM, H., SIEWERS, U., STEENFELT, A. & TARVAINEN, T. 2005: *Geochemical Atlas of Europe, Part 1, Background Information, Methodology and Maps*. – Geological Survey of Finland (Espoo), 1–526.
- ŠAJN, R. 2003: Distribution of chemical elements in attic dust and soil as reflection of lithology and anthropogenic influence in Slovenia. *Journal de Physique*, 107: 1173–1176.
- UR. LIST RS (Official Gazette RS), 1996: Uredba o mejnih, opozorilnih in kritičnih imisijskih vrednostih nevarnih snovi v tleh (in Slovenian). *Uradni list Republike Slovenije*, 68/96: 5773–5774.
- VERBIČ, M. 1965: Idrijski rudnik do konca 16. stoletja. Inavguralna disertacija (Ljubljana), 1–250. (neobjavljeno).
- WEBER, J.H. 1988: Binding and transport of metals by humic materials. In: Frimel, F.H., Christman, R.F., editors. *Humic substances and their role in the environment*. John Wiley and Sons, 165–178.
- ŽIBRET, G. & GOSAR, M. 2006: Calculation of the mercury accumulation in the Idrija river alluvial plain sediments. *The Science of the Total Environment*, 368: 291–297.

Model dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov v Sloveniji v merilu 1 : 250.000

Debris-flow susceptibility model of Slovenia at scale 1 : 250,000

Marko KOMAC¹, Špela KUMELJ¹ & Mihael RIBIČIČ²

¹Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ul. 14, SI-1000 Ljubljana, Slovenija; e-mail: marko.komac@geo-zs.si; spela.kumelj@geo-zs.si

²Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani, Privoz 11, SI-1000 Ljubljana, Slovenija; e-mail: mihael.ribicic@ntf.uni-lj.si

Prejeto / Received 28. 4. 2009; Sprejeto / Accepted 15. 5. 2009

Ključne besede: drobirski tokovi, dovzetnost za pojavljanje, vplivni faktorji, model, plazovi, GIS, Slovenija
Keywords: debris-flow, susceptibility, influence factors, model, landslides, GIS, Slovenia

Izvleček

Za območje Slovenije, ki meri preko 20.000 km², smo izdelali model dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov v merilu 1 : 250.000. Za izračun dovzetnosti za pojavljanje tega redkega in zapletenega pobočnega masnega premikanja v GIS-u smo uporabili informacijske sloje, ki opisujejo geologijo (litologija in oddaljenost od prelomnih struktur), intenzivnejše padavine (48-urne padavine), izpeljanke digitalnega modela višin, ki opisujejo geomorfološke značilnosti terena (naklon in ukrivljenost pobočja, energijski potencial povezan z nadmorsko višino), mreže površinskih vodnih tokov (oddaljenost od površinskih tokov, energijski potencial strug) ter lokacije šestnajstih znanih pojavov drobirskih tokov, ki so bile uporabljene za oceno kvalitete modelov dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov. Z namenom izdelati enostaven in obstojen model, ki bi bil uporaben tudi na drugih območjih, je bila za izdelavo modela izbrana metoda linearne utežene vsote, uporabljeni pa so bili enostavno dostopni prostorsko-časovni dejavniki. Na podlagi izračunov 672-ih linearnih modelov z različnimi kombinacijami uteži uporabljenih prostorsko-časovnih dejavnikov in rezultatov natančnosti njihove napovedi območij, podvrženih pojavom drobirskih tokov, smo izbrali najprimernejšo kombinacijo uteži. Model je namenjen prostorskemu napovedovanju območij nastanka/sprožitve in transportnih območij drobirskih tokov in predstavlja splošni pregled izpostavljenih območij v Sloveniji ter osnovo za nadaljnje podrobnejše raziskave in analize. Pokazal je, da je zelo velika dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov na okoli 4% površine ozemlja Slovenije in velika na okoli 11% površine. Po pričakovanju ta območja večinoma pripadajo alpskemu in goratemu svetu NW in N Slovenije.

Abstract

For the area of Slovenia (20.000 sq. km) a debris-flow susceptibility model at scale 1 : 250,000 was produced. To calculate the susceptibility to debris-flow occurrence using GIS several information layers were used such as geology (lithology and distance from structural elements), intensive rainfall (48-hour rainfall intensity), derivatives of digital elevation model (slope, curvature, energy potential related to elevation), hydraulic network (distance to surface waters, energy potential of streams), and locations of sixteen known debris flows, which were used for the debris-flow susceptibility models' evaluation. A linear model weighted sum approach was selected on the basis of easily acquired spatio-temporal factors to simplify the approach and to make the approach easily transferable to other regions. Based on the calculations of 672 linear models with different weight combinations for used spatio-temporal factors and based on results of their success to predict debris-flow susceptible areas, the best factors' weight combination was selected. To avoid overfitting of the prediction model, an average of weights from the first hundred models was chosen as an ideal combination of factor weights. For this model also error interval was calculated. A debris-flow susceptibility model at scale 1 : 250,000 represents a basis for spatial prediction of the debris-flow triggering and transport areas. It also gives a general overview of susceptible areas in Slovenia and gives guidance for more detailed research areas and further spatial and numerical analyses. The results showed that approximately 4 % of Slovenia's area are extremely high susceptible and approximately 11 % of Slovenia's area of susceptibility to debris-flows is high. As expected these areas are related to mountainous terrain in the NW and N of Slovenia.

Uvod

Drobirski procesi so vzrok številnim naravnim nesrečam in z njimi povezanimi družbeno-ekonomskimi problemi v gorskih predelih po vsem svetu (NAKAGAWA et al., 2000, 2001). TAKAHASHI (1991) navaja, da so drobirski tokovi na Japonskem v obdobju med letoma 1967 in 1987 zahtevali najmanj 1250 življenj, v Avstriji pa so po EMBLETON-HAMANU (1997) hudourniške poplave in hudourniški izbruhi skupaj z drobirskimi tokovi zahtevali v obdobju med letoma 1971 in 1991 46 življenj. OLDNALL (2004) navaja, da je samo v petih največjih naravnih nesrečah v dvajsetem stoletju, v katerih so drobirski tokovi igrali najpomembnejšo vlogo, življenje izgubilo okoli 220.000 ljudi, ekonomska škoda za le enega od teh dogodkov pa je ocenjena na 8,5 milijard evrov. V Sloveniji so drobirski tokovi redek pojav, toda v letu 2000 se je v Logu pod Mangrtom sprožil velik drobirski tok, kjer je življenje izgubilo 7 ljudi (MIKOŠ, 2001). Ta pojav je mogoče razumeti kot sprožilni vzrok, da je treba drobirske tokove, kot redke, toda izjemno nevarne pojave, sistematično proučevati. Eden izmed rezultatov teh raziskav je tudi pričujoč Zemljevid dovzetnosti (tudi podvrženost) za pojavljanje drobirskih tokov v Sloveniji v merilu 1 : 250.000.

Drobirski tokovi so procesi pobočnega masnega premikanja velikih hitrosti, ki se v večini primerov pojavljajo v plitvih, grobozrnatih zemljinah na strmih pobočjih. Sprožitelj je prekomerno povečanje vsebnosti vode v zemeljski masi, ki je običajno posledica močnega deževja (FLEMING et al., 1989; MAINALI & RAJARATNAM, 1994; ANDERSON, 1995; CRUDEN & VARNES, 1996; DAI et al., 1999; FIORILLO & WILSON, 2004; LAN et al., 2004; WEN & AYDIN, 2005), čeprav je količino padavin, pri katerih se sprožijo drobirski tokovi, zaradi zelo spreminjajočih se hidrogeoloških pogojev v goratih predelih, težko natančneje določiti (BARDOU & DELALOYE, 2004). Sprožilni dejavnik drobirskih tokov je lahko tudi hitro taljenja snega (RICKENMANN & ZIMMERMAN, 1993; CARSON, 2002; BARDOU et al., 2003), ki pa ni nujno povezano s pojavom obilnih padavin. Zaradi svoje hitrosti predstavljajo drobirski tokovi veliko nevarnost za prebivalstvo in lastnino, njihova gostota pa omogoča premikanje večjih blokov kamenja, drevja in večjih predmetov, tudi avtomobilov (CRUDEN & VARNES, 1996). TAKAHASHI (2007) pripisuje izvor materiala za nastanek drobirskih tokov dvema procesoma, eroziji ali zemeljskim plazovom.

RIBIČIČ (2002) razlaga, da je drobirski tok kompleksen pojav, ki sloni na značilnih in poznanih mehanizmih nastanka, proženja, transporta in končnega razlitja viskozne mase iz kamninskih in vodnih delcev. Za nastanek drobirskega toka morajo biti na mestu žarišča podane specifične morfološke, geološke in hidrološke razmere, ki pogjujejo, da se ob ekstremnih padavinah večja količina nesprijetega ali slabo sprijetega kamninskega materiala saturira z vodo do te mere, da preide iz trdne v tekočo fazo. Da pride do proženja drobirskega toka, mora kamninska masa

vsebovati tako grob kamninski material (drobir), kot tudi drobne frakcije, med katerimi pa ne sme prevladovati glinasta frakcija, saj bi v tem primeru lahko prišlo do počasnega blatnega pobočnega toka. Tekoča masa po običajno strmo nagnjenem pobočju zdrsnje v hudourniško strugo, po kateri lahko kot drobirski tok potuje več kilometrov daleč, če konveksnost in nagib terena to omogočata. Gibanje drobirskega toka ohranjajo kinetična energija premikajoče se mase in trki med kosi drobirja v toku. Čelo toka ob napredovanju vključuje material iz struge, drevesa in ves material, ki je na poti toka. Na ta način se drobirski tok »hrani« in postaja po količini zajetega materiala vedno večji. Ko se nagib vodotoka zmanjša ali močno razširi, se drobirski tok lahko ustavi. Največkrat pa se drobirski tok konča v dolini, kjer se razlije kot vršaj. Drobirski tok je torej gravitacijski (hiperkoncentriran) tok mešanice zemljin, hribin, skal, vode in/ali zraka, ki se ob izjemnih padavinah (redko tudi ob potresu, vulkanu), »utekočini«.

Po SKABERNETU (2001) je drobirski tok plastični tok zmesi kohezivnega, pogosto slabo sortiranega materiala in vode s spremenljivo porazdelitvijo velikosti zrn, koncentracijo, hitrostjo in dinamiko. Drobirski tokovi nastajajo v sedimentacijskih okoljih (kopenskih in podvodnih) in se običajno razvijejo iz plazenja. Na kopnem nastanejo drobirski tokovi v vseh klimatskih pogojih, običajno pa jih povzroči hitro povečanje porne vode v materialu ali zaradi močnega deževja ali pa zaradi hitrega taljenja snega. Redkejša vzroka za nastanek drobirskega toka sta lahko tudi potresna in vulkanska dejavnost. SKABERNE (2001) tudi predlaga, da je izraz »drobirski tok« vezan na reološke lastnosti toka, zato predlaga, da se v izogib nespornom pred izrazom uporablja predpona, s katero so natančneje opredeljene lastnosti prevladujočega materiala v toku. PETKOVŠEK (2001) navaja, da so reološke lastnosti drobirskega toka, ki je v svoji osnovi trifazni tok, funkcija viskoznosti, turbulence ter dinamike med delci – trkov in drsenja.

MIKOŠ (2001) definira drobirski tok kot hiperkoncentrirani tok mešanice vode in sedimentov, poenostavljeno torej dvofazni tok, ki ga določajo prostorninska gostota, zrnavost sedimenta in hidravlične razmere ter drugi naključni vplivni dejavniki, ki določajo tretjo fazo in jih je z enačbami težko definirati. Gibanje drobirskih tokov sodi v področje dinamike nenevtonskih tekočin, kjer je nujno dobro poznati reološke značilnosti obravnavanega erozijskega drobirja. Glede na nastanek in razvoj je možno drobirski tok podobno kot večino erozijskih procesov deliti na tri dele oziroma ga opisati, kakor da bi bil sestavljen iz treh procesov: proženja, gibanja in odlaganja. Ker je dinamika gibanja in akumulacije drobirskih tokov oziroma njihovega materiala zapletena, z vidika matematičnega in prostorskega modeliranja pa predstavlja velik izziv, je pristopov k modeliranju drobirskih tokov kar nekaj. CHRISTENSEN in sodelavci (2009) so razvili kompleksen matematični model simulacije različnih

pobočnih masnih premikanj za GIS. POZZONI in sodelavci (2009) ter ZHOU in sodelavci (2003) so k modeliranju dinamike drobirskih tokov pristopili z metodo Monte Carlo. Podjetje R2 Resource Consultants je za Oregonski oddelek za gozdove (Oregon Department of Forestry) izdelalo analizo ogroženosti gozdov zaradi drobirskih tokov in plazov (2005), v kateri so izbrali izkustveni pristop. KOWALSKI in McELWAIN (2008) sta za območje Illgrabna v Švici modelirala dinamiko drobirskega toka po načelu dvofaznega toka, podobno pa so se problematike na Japonskem lotili WANG in sodelavci (2006). Za območje Hobarta je MAZENGARB (2004) na podlagi analize pojavljanja in ob pomoči metode, ki sta jo razvila DIETRICH in MONTGOMERY (1998), izdelal zemljevid nevarnosti zaradi pojavljanja drobirskih tokov, ki je zaradi natančnosti merila 1 : 25.000 že uporabna za prostorsko načrtovanje na lokalnem nivoju. MILLER in BURNETT (2008) sta uporabila probabilistični pristop za določanje akumulacijskih območij (vršajev) na nivoju struge, model pa je možno uporabiti tudi na nivoju porečja. Z metodo biavjatne analize so GUINAU in sodelavci (2007) določili območja z večjo verjetnostjo nastanka drobirskih tokov v zahodni Nikaragvi. Različne pristope k ocenjevanju magnitud drobirskih tokov sta povzela SODNIK in MIKOŠ (2006). Analize pojavljanja vršajev s pomočjo prostorskih analiz digitalnega modela reliefa sta se na testnem območju Zgor-njesavske doline lotila tudi PODOBNIKAR in SZÉKE-LY (2008).

Drobirski tokovi imajo tudi velik vpliv na vodne habitate v strugah, kjer se pojavljajo. FANNIN in ROLLERSON (1993) tako navajata, da je erozijski vpliv drobirskih tokov na strugo odvisen od naklona struge, geomorfologije in relativnega položaja prizadete struge v vodni mreži. Drobirski tokovi lahko v strugah z velikimi relativnimi padci erodirajo strugo do matične kamnine, obenem pa uničijo večino obvodne vegetacije (SWANSON et al., 1998).

Slovenija je zaradi pestrosti geološke zgradbe, geodinamike, geografske lege, ki pogojuje regionalno in mikroklimo ter geomorfoloških značilnosti poleg pogostejših procesov pobočnih masnih premikanj izpostavljena tudi pojavom drobirskih tokov. Najbolj znan primer je že omenjeni drobirski tok, ki je novembra 2000 prizadel vas Log pod Mangartom (npr. MIKOŠ, 2001), a ta še zdaleč ni edini. Budnemu očesu obiskovalca gorskih in hribovitih delov Slovenije ne uidejo številni pojavi vršajev, ki pričajo o pogostosti pojavljanja drobirskih tokov na našem ozemlju v recentnem obdobju z vidika geološkega pojmovanja časa. Številna domača literatura, ki obravnava drobirske tokove, nedvomno priča o aktualnosti pojavov drobirskih tokov na slovenskem ozemlju. Pomen njihovega razumevanja dokazuje tudi s strani Javne agencije za raziskovalno dejavnost financirani ciljni raziskovalni projekt – CRP M2-0144 »Ocena ogroženosti zaradi delovanja drobirskih tokov«, v okviru katerega so bile opravljene v nadaljevanju predstavljene analize.

Študijsko območje in uporabljeni podatki

Kljub dejstvu, da so sprožitelji drobirskih tokov običajno enkratni dogodki kot so na primer močna deževja, taljenje snega, potresi, človeški posegi v prostor, pa je njihovo prostorsko in količinsko pojavljanje odvisno od več povzročiteljev – dejavnikov kot so litološko-strukturne, hidrografske in geomorfološke značilnosti terena (LIN et al., 2002). MELELLI in TARAMELLI (2004) sta pri svojem modeliranju nevarnosti nastanka drobirskih tokov z uporabo GISa določila štiri dejavnike vpliva, geologijo, naklon pobočij, oddaljenost od prelomov in oddaljenost od površinskih vodnih tokov. DELMONACO in sodelavci (2003) so svoj pristop k oceni nevarnosti nastanka drobirskih tokov na večjem območju (porečje Vezza v Italiji) razdelili na več korakov. Ti temeljijo na laboratorijskih preiskavah materiala, ki so služili kot eden od vhodnih podatkov za GIS modeliranje napovedi v odvisnosti od vplivnih prostorsko-časovnih dejavnikov. Kot vhodne podatke so avtorji uporabili lokacije plazov, debelino podlage, naklon pobočij, litološke značilnosti terena in frekvenco padavin.

Na podlagi literature (ALZATE et al., 1999; LIN et al., 2002; MELELLI & TARAMELLI, 2004; GUINAU et al., 2007; DI et al., 2008; MERGLI, 2008), izkušenj in strokovne ocene, smo se odločili, da pri modeliranju dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov v Sloveniji uporabimo podatke o litološki zgradbi, oddaljenosti od prelomov, naklonu in naklonskem potencialu terena, o padavinah, oblikovanosti (ukrivljenosti) pobočij, energetskem potencialu vodotokov ter o oddaljenosti od površinskih tokov.

Geologija – litologija

Za oceno dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov z vidika litološke zgradbe terena smo kot osnovni podatek privzeli Geološko karto Slovenije v merilu 1 : 250.000 (BUSER, v tisku), ki deli slovensko ozemlje na 114 litostratigrafskih členov. Na podlagi strokovne geološke ocene smo vsako od *litostratigrafskih enot* na podlagi njenih mehanskih lastnosti razvrstili v enega od 8 razredov dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov. Kot dodatni dejavnik vpliva smo upoštevali *prisotnost prelomov in narivov*, ki prispeva k večji možnosti nastanka drobirskih tokov (POLJAK, 2000).

Padavine

Padavine so se izkazale kot pomemben sprožilni dejavnik za nastanek drobirskih tokov (npr. DELMONACO et al., 2003; FIORILLO & WILSON, 2004; LAN et al., 2004; WEN & AYDIN, 2005), zato je smiselno sklepati, da se le-ti pogosteje in v večjih razsežnostih pojavljajo na tistih območjih v Sloveniji, kjer nastopajo intenzivnejše padavine. Med možnimi podatki o padavinah smo za analizo izbrali podatkovni niz o *48-urnih maksimalnih padavinah s 50-letno povratno dobo* za območje Slovenije (obdobje izvornih podatkov je 1961 – 2000) (ARSO, 2003). Prostorski prikaz niza 48-urnih padavin

pokaže, da so ekstremne padavine močnih intenzitet, vezane na alpska in hribovita območja, kjer prihaja do intenzivnega dviganja vlažnega zraka in drugih učinkov konvekcije zračnih mas, kar povzroča povečanje intenzitete padavin.

Digitalni model višin

Da lahko z vodo prepojen (saturiran) kamninski material, ki je po sestavi ugoden za nastanek drobirskega toka, preide v nenadno gibanje, se mora nahajati na nagnjenem pobočju, kjer se lahko potencialna energija spremeni v kinetično. *Naklon* pobočja območja nastanka/sprožitve vpliva na možnost zdrsov materiala, ki se v nadaljni fazi razvije v drobirski tok.

Morfološka oblikovanost terena (*ukrivljenost*) je pomemben dejavnik, ki vpliva na možnost potovanja drobirskega toka v nižje lege. Na osnovi digitalnega modela višin je mogoče določiti konkavne oblike terena (v danem primeru struge), kot primerne za potovanje drobirskih tokov.

Pojavljanje drobirskih tokov je vezano na visoka skalna pogorja (npr. RICKENMANN & ZIMMERMAN, 1993; MIKOŠ, 2001; ARCHETTI & LAMBERTI, 2003; JEŽ et al., 2008; TOYOS et al., 2008). Najbolj pogosti in največji nastopajo v območju Himalaje, v Andih in Alpah, pojavljajo pa se tudi v nižjih gorovjih. Podobno velja za Slovenijo, kjer pogostost in obsežnost drobirskih tokov pada z nadmorsko višino. Zaradi navedenega je bil kot eden od dejavnikov vpliva in upoštevan v modelu napovedi, izdelan *naklonski potencial terena glede na višinske pasove*. Ta informacijski sloj predstavlja potencialno energijo materiala drobirskega toka, ki se ob sprožitvi pretvori v kinetično energijo. Za potrebe izračuna podatkov o naklonu, ukrivljenosti pobočij in naklonskega potenciala smo uporabili digitalni model višin za območje Slovenije z ločljivostjo 25×25 m (GURS, 2005).

Površinski vodotoki

Voda igra pomembno vlogo pri procesu transporta drobirskih tokov v nižje ležeča območja (npr. MIKOŠ, 2001). Podatkovni niz površinskih vodotokov (ARSO, 2005) predstavlja osnovo za izračun dveh vplivnih dejavnikov, *oddaljenost od vodotokov* in *energetski potencial vodotokov*.

Potencialna žarišča drobirskih tokov morajo gravitirati v vodotok, da se lahko zgodi transport drobirskega materiala po njem v dolino. Čim bližje vodotoku je žarišče tem večja je možnost, da večja količina materiala iz žarišča (območja nastanka/sprožitve, tudi inicialnega območja) zdrs-

ne v strugo po kateri lahko potuje kot drobirski tok.

Energetski potencial vodotokov sodi med transportne vplivne dejavnike za nastanek drobirskih tokov, ki po sprožitvi toka na območju nastanka/sprožitve vplivajo na njegovo potovanje. Energetski potencial posameznega vodotoka je določen z razmerjem med njegovo višino in dolžino ter predstavlja stopnjo relativnega padca poti oziroma materiala vzdolž struge vodotoka, po kateri potuje. Večja ko je vrednost tega razmerja, večja je možnost nastanka oziroma transporta materiala po nastanku drobirskega toka na območju nastanka/sprožitve.

Pojavi drobirskih tokov

Pretekli pojavi drobirskih tokov so v Sloveniji slabo dokumentirani. Vzrok takemu stanju je redkost pojavov in seveda šele nedavno zavedanje pomena evidenc oziroma katastra pojavov, ki podrobneje opisujejo posamezne lokacije, sprožitelje in včasih tudi škodo, ki jo povzročijo. Na podlagi podatkov o desetih historičnih in recentnih drobirskih tokovih, pridobljenih iz zapisov in terenskih opazovanj ter šestih domnevnih pojavov, določenih na podlagi aero posnetkov, smo določili območja nastanka/sprožitve in transportna območja drobirskih tokov. Preglednica 1 podaja osnovne informacije pojavov drobirskih tokov v severni in zahodni Sloveniji, katerih skupna površina obsega 3,99 km², ki so se skupaj razprostirali na 6385-ih celicah, od katerih jih je 24 ležalo na iz nadaljnjih analiz izločenem območju.

Metodologija

Iz opisa nastanka, proženja, potovanja in razlitja drobirskega toka izhajajo tudi vplivni prostorsko-časovni dejavniki, ki drobirski tok povzročijo, oziroma omogočijo njegovo potovanje in akumulacijo. Po sproženju drobirskega toka ali plazju, iz katerega se razvije drobirski tok, morajo biti dani pogoji za njegovo potovanje, ki jih določajo naklon in konveksna oblika pobočja ali pa ustrezni pogoji v strugi vodotoka. Povzročilne dejavnike, ki prispevajo k nastanku in sprožitvi materiala, smo imenovali **inicialne dejavnike**, tiste, ki določajo gibanje drobirskega toka pa smo poimenovali **transportne dejavnike**. V napoved dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov nismo vključili območij akumulacije, saj je za modeliranje njihovega nastanka oziroma določitve območij potrebnih več podatkov, pridobljenih s podrobim terenskim po-

Št.	A (km ²)	Lokacija	Št.	A (km ²)	Lokacija
1	0,368	Presušnik, Karavanke	9	0,089	Ciprnik, Tamar
2	0,039	Mlinca, Karavanke	10	0,062	Trebiža, Karavanke
3	0,037	Mlinca-Žakelj, Karavanke	11	0,224	Stovže, Julijske Alpe, Trenta
4	0,034	Dobršnik, Karavanke	12	0,019	Koseč, Julijske Alpe, dolina Soče
5	0,082	Belca 1, Karavanke	13	0,168	Lokavec, Vipavska dolina
6	0,157	Kurji graben, Karavanke	14	0,498	Koroška Bela, Karavanke
7	0,048	Belca 2, Karavanke	15	0,149	Čedca, Karavanke
8	0,136	Suhelj, Karavanke	16	1,873	Kropa, Jelovica

Preglednica 1. Osnovne informacije pojavov drobirskih tokov v severni in zahodni Sloveniji.

Table 1. Basic information on debris-flow occurrence in N and W Slovenia.

pisom vzorčnega števila vršajev in z analizami visokoločljivega digitalnega modela reliefa, napoved akumulacijskih območij pa vsebuje tudi hidravlično modeliranje s posebnimi programski orodji.

Izpostaviti velja, da v prispevku predstavljena metoda zaradi pomanjkanja reprezentativnega vzorca drobirskih tokov temelji na izkustvenem pristopu, ovrednotena pa je z oceno kakovosti napovedi šestnajstih pojavov drobirskih tokov v Sloveniji. Pri izdelavi poenostavljenega modela za območje celotne Slovenije v merilu 1 : 250.000 smo uporabili le najpomembnejše vplivne prostorsko-časovne dejavnike, prav tako pa v model nismo vključili parametrov dvo ali več faznega obnašanja drobirskih tokov. Vse analize in modeli so bili izdelani v GISu. Po načinu prispevka informacije posameznega prostorsko-časovnega dejavnika v končni model napovedi so ti lahko uteženi dejavniki (UD v Preglednici 2), katerih razredi prispevajo k modelu z vrednostmi med 0 in 1, ali pa izločilni dejavniki (ID v Preglednici 2), ki s svojimi vrednostmi določajo območja, ki so izločena iz nadaljnjih operacij, torej območja, kjer se določen dogodek ne more zgoditi.

Preglednica 2 prikazuje le najpomembnejše prostorsko-časovne dejavnike, ki vplivajo na nastanek in transport drobirskih tokov in ki so bili uporabljeni v postopku izdelave modela dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov v Sloveniji. Poleg dejavnikov, navedenih v preglednici 2, na pojavljanje, transport in odlaganje seveda vplivajo še drugi prostorsko-časovni dejavniki, ki pa so bili za potrebe analiz v merilu 1 : 250.000 izločeni zaradi preobsežnosti izračunov oziroma zaradi prepodrobnih geoloških, geomehanskih in geomorfoloških značilnosti posameznih območij, litoloških členov in fizikalnih lastnosti toka. Primarni namen analize je prikazati območja v Sloveniji, kjer je pojavljanje drobirskih tokov možno in kjer bi morali za potrebe posegov v prostor izvesti dodatne podrobnejše terenske in laboratorijske raziskave ter modeliranje. Kljub dejstvu, da smo za evalvacijo modelov uporabili relativno podrobne podatke o pojavih drobirskih tokov, pa namen modela ni natančna opredelitev lokacij nastanka in transporta ter izpostavljenosti posameznih objektov. Model služi le kot opozorilna informacija, ki določa območja nadaljnjih podrobnejših ukrepov.

Priprava podatkov vplivnih prostorsko-časovnih dejavnikov

Litologija

Litostratigrafske člene izvorne geološke karte (BUSER, v tisku) smo na podlagi strokovne ocene razvrstili v osem razredov glede na dovzetnost litološkega člena za pojavljanje drobirskega toka. Podoben pristop sta izbrala MARCHI in D'AGOSTINO (2001), CERIANI in sodelavci (2000) pa so vrednostim, ki določajo dovzetnost za pojavljanje drobirskih tokov posameznih litoloških členov, dodali še utež glede na delež površine člena v vsakem prispevnem območju vršaja. Zaradi obsežnosti

območja analiz smo se odločili za izkustveni pristop k določitvi ocen litoloških členov.

Pri kriteriju razvrščanja posameznega litostratigrafskega člena iz Geološke karte Slovenije v merilu 1 : 250.000 (BUSER, v tisku) v razrede dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov smo upoštevali značilnosti kamnine, ki pogojujejo nastanek drobirskega toka. Za nastanek le-tega morajo biti z vidika litoloških dejavnikov izpolnjeni trije pogoji. Na potencialnem območju za nastanek drobirskega toka morajo (1) obstajati kamnine, ki dajejo grob kamninski material (drobir) in (2) kamnine, ki dajejo komponento drobne frakcije – to so glin, melji in peski, pri čemer pa (3) glinasta frakcija ne sme prevladovati. Grob nekoherenten kamninski material običajno izvira iz magmatskih in karbonatnih kamnin, pri klastitih pa iz peščenjakov, breč in konglomeratov ter njihovih pobočnih nanosov, torej moren, gruščev in melišč. Fin koherenten material običajno izvira iz polhribin, pobočnih nanosov, pa tudi klastitov. Posebno obravnavo zahtevajo nekateri tipi aluvialnih nanosov, ki po svoji zrnski sestavi ustrezajo lastnostim materiala primerne za drobirske tokove, a se nahajajo na ravninskih predelih. Na nivoju merila izdelanega modela dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov je bilo razlikovanje med različnimi tipi aluvialnih nanosov nemogoča. Obenem se vse enote znotraj te skupine nahajajo na ravninskih predelih (enote kot so pobočne morene, tili, grušči, breče, melišča in skalni podori so razvrščeni posebej), zato je skupina »aluvialni nanosi« razvrščena v najnižji razred dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov. Preglednica 3 prikazuje končno razvrstitev skupin litoloških členov glede na njihovo dovzetnost za pojavljanje drobirskih tokov in vrednosti razredov po normalizaciji. V primeru razredov 5 in 6 smo opravili strokovni popravek razvrstitve posameznih enot zaradi posebnih pogojev dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov. Tako so bila območja na stiku (torej ob geoloških mejah) med klastiti in karbonati ter med klastiti in magmatskimi kamninami razvrščena v višji razred dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov.

Vrsta kamnine v preglednici 3 se nanaša na opise litostratigrafskih enot Geološke karte Slovenije v merilu 1 : 250.000 (BUSER, v tisku). Podrobne opise litostratigrafskih enot pa lahko bralec najde v literaturi KOMAC (2005) ali KOMAC et al. (2005).

Oddaljenost od prelomov in narivov

Izhajajoč iz predpostavke, da so kamnine v nekem pasu ob večjih prelomih in narivih zdrobljene ter zato bolj podvržene preperevanju in drobljenju, kar zagotavlja več materiala za potencialne drobirske tokove, smo kot dodatni vplivni dejavnik uporabili območja v oddaljenosti 50-ih metrov na vsako stran od preloma ali nariva ($N = 1$). Taka območja prispevajo k večji dovzetnosti litoloških členov za pojavljanje drobirskih tokov, zato je bila ocena podvrženosti litološkega člena v območju 50-metrskega pasu od posameznega preloma po-

Preglednica 2. Najpomembnejši prostorsko-časovni dejavniki, ki vplivajo na nastanek drobirskih tokov in so bili uporabljeni v postopku izdelave modela dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov v Sloveniji. UD predstavlja oznako za uteženi dejavnik v modelu, ID pa izločitveni dejavnik.

Inicialni dejavniki

litolška zgradba terena (UD), oddaljenost od prelomov (UD), naklon terena (ID, UD), naklonski potencial (UD) in padavine (UD).

Transportni dejavniki

konkavnost oblike pobočja (UD), energetska potencial vodotokov (UD) in oddaljenost od površinskega vodotoka (UD).

Table 2. The most significant spatio-temporal factors that influence the debris-flow occurrence, which were used for the calculation of the debris-flow susceptibility model in Slovenia. UD stands for weighted factor and ID stands for rejection factor.

Dovzetnost za pojavljanje drobirskih tokov	Vrsta kamnine	A (%)	N – Vrednost razreda po normalizaciji
1	aluvialni nanosi	17,17 %	0,00
2	polhribine (gline, peski, melji)	12,11 %	0,14
3	magmatske kamnine (tonaliti, idr.)	1,83 %	0,29
4	karbonati (brez vložkov drugih kamninami oz. brez menjavanja z drugimi kamninami)	35,32 %	0,43
5*	klastiti	19,38 %	0,57
6*	klastiti z vložki karbonatnih kamnin	10,10 %	0,71
7	grušči, breče, skalni podori, melišča	3,05 %	0,86
8	pobočne morene, tili	1,04 %	1,00

*V šesti razred so bile razvrščene celice, ki mejijo na kamnine 5. in 4. razreda, v peti razred pa so bile razvrščene celice, ki mejijo na kamnine 5. in 3. razreda. / Pixels that touch 5th and 4th class were classified into the 6th and pixels that touch 5th and 3rd class were classified into the 5th class.

večana za en razred. Pri tem smo prispevek prelomov pri dveh razredih z največjo dovzetnostjo za pojavljanje drobirskih tokov zanemarili zaradi argumenta kronološkega sosledja odlaganja sedimentov teh dveh skupin po večjih regionalnih tektonskih aktivnostih.

Padavine

Pomen padavin pri pojavljanju drobirskih tokov je bil izpostavljen že v uvodnem poglavju (za vire glej Uvod). Glede na relativno večjo količino vode, ki je potrebna za sprožitvev drobirskega toka v primerjavi s sprožitvijo zemeljskega plazju, smo se odločili, da so podatki o maksimalnih 48-urnih padavinah primernejši za modeliranje dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov od podatkov o maksimalnih 24-urnih padavinah, medtem ko podatki o dolgotrajnejših obdobjih padavin (npr. za obdobje enega meseca) slabše izrazijo območja maksimalnih padavin. Podatki o vplivnem dejavniku maksimalne 48-urne padavine (mm/48 urah) so bili že v osnovi razdeljeni v 16 razredov z razponom 30 mm. Ker je mejna vrednost količine padavin, pri kateri se sprožijo drobirski tokovi, težko določljiva oziroma se močno spreminja, smo izhajali iz predpostavke, da obilnejše in pogostejše padavine pomenijo večjo možnost pojavljanja drobirskih tokov. Na podlagi takega predvidevanja smo razredu z največjo količino padavin pri normalizaciji pripisali največjo vplivno vrednost parametra (N = 1), razredu z najmanjšo količino padavin pa najmanjšo vplivno vrednost parametra (N = 0) (Preglednica 4). Slednja predpostavka ne pomeni, da se na območjih z najmanjšo količino padavin drobirski tokovi ne morejo pojavljati temveč pomeni le, da je na teh območjih prispevek padavin v primerjavi z drugimi vplivnimi dejavniki minimalen.

Preglednica 3. Razvrstitev kamninskih tipov glede na njihovo dovzetnost za pojavljanje drobirskih tokov.

Table 3. Lithological types (Vrsta kamnina) and estimation of their susceptibility to debris-flow.

Preglednica 4. Razredi dejavnika »maksimalne 48-urne padavine«.

Table 4. »48-hour rainfall intensity« classes and estimation of their susceptibility to debris-flow.

Razred	Količina padavin (mm/48 ur)	A (%)	N – Vrednost razreda po normalizaciji
1	< 120	6,72 %	0,00
2	120 – 150	34,06 %	0,07
3	150 – 180	23,50 %	0,13
4	180 – 210	12,15 %	0,20
5	210 – 240	7,55 %	0,27
6	240 – 270	4,37 %	0,33
7	270 – 300	3,32 %	0,40
8	300 – 330	2,46 %	0,47
9	330 – 360	1,48 %	0,53
10	360 – 390	0,98 %	0,60
11	390 – 420	0,89 %	0,67
12	420 – 450	0,71 %	0,73
13	450 – 480	0,59 %	0,80
14	480 – 510	0,60 %	0,87
15	510 – 540	0,33 %	0,93
16	540 – 570	0,30 %	1,00

Naklon pobočja

Nekateri avtorji (BENDA & CUNDY, 1990) nava-jajo, da se drobirski tokovi sedimentirajo pri nagibih, večjih od 3,5°. MAZENGARB (2004) ter TOYOS in sodelavci (2008) so minimalni kot določili pri 5°, MELELLI in TARAMELLI (2004) pri 7°, Odbor za vršaje (*angl. Committee on Alluvial Fan Flooding*) (1996) pa pri naklonih med 6° in 8° za drobirske tokove z najvišjim razmerjem med materialom in vodo, ki so tudi najbolj uničujoči in nevarni. Terensko opazovanje na pobočju odloženih naravnih nevezanih materialov pokaže, da se na pobočju z naklonom, večjim od 45°, gruščnat in preperinski material ne more zadržati v dovolj veliki debelini, da bi lahko predstavljal potencialno mesto za

nastanek drobirskega toka. Naklon pobočja pod 5° predstavlja edini izločitveni dejavnik med uporabljenimi v modelu napovedi.

Zaradi navedenega so bila iz nadaljnje analize izločena vsa območja z nakloni manjšimi od 5°. V najnižji razred z oznako 0, v katerem je verjetnost pobočnega premikanja zanemarljivo majhna, smo uvrstili vsa pobočja z nagibom med 5° in 9°, ter vsa pobočja z naklonom večjim od 45°, pri katerih način transporta materiala ne sodi več med plazenja temveč je definiran kot zdrs oziroma padec kamninskih gmot. Pobočja z nakloni med 9° in 45° smo razvrstili v šest razredov z razponom 6°. Pri razvrstitvi razredov in posredno določitvi njihovega vpliva smo izhajali iz načela, da so strmehjša pobočja bolj podvržena pobočnim masnim premikom. Razredi vplivnega dejavnika »naklon pobočja« in njihove vrednosti po normalizaciji so predstavljene v preglednici 5.

Preglednica 5. Razredi dejavnika »naklon pobočja«.

Table 5. »Slope angle« classes and estimation of their susceptibility to debris-flow.

Razred	Naklon (°)	A (%)	N – Vrednost razreda po normalizaciji
-	< 5°	27,77%	-
0	5° - 9° in > 45°	15,77%	0,00
1	9° - 15°	19,97%	0,17
2	15° - 21°	15,23%	0,33
3	21° - 27°	10,02%	0,50
4	27° - 33°	6,44%	0,67
5	33° - 39°	3,55%	0,83
6	39° - 45°	1,25%	1,00

Naklonski potencial po višinskih pasovih

Izhodišče vključitve sloja »naklonski potencial po višinskih pasovih« je bila empirična predpostavka, da pogostost in velikost drobirskih tokov narašča z višanjem nadmorske višine. Kot že predhodno omenjeno, za določitev vpliva posameznih razredov znotraj dejavnika ni bilo na voljo reprezentativnega števila vzorcev, saj so bili ti uporabljeni za validacijo modelov. Zato smo za potrebe razvrstitve pasov nadmorske višine, združitve v nove razrede in določitve normalizacijskih vrednosti, izvedli analizo povprečnih naklonov pobočij znotraj stometrskih višinskih pasov.

Rezultat je nov generično pridobljen dejavnik, imenovan naklonski potencial po višinskih pasovih, ki nosi informacijo o nadmorskih višinah. Ta informacijski sloj nosi poenostavljeno informacijo o potencialni energiji materiala drobirskega toka, ki se ob sprožitvi pretvori v kinetično energijo. 29 razredov stometrskih višinskih pasov (R, Preglednica 6) smo razdelili na osem razredov glede na spremembo trenda porazdelitve povprečnega naklona (PN, Preglednica 7), kar pomeni, da so bili višinski pasovi na novo razvrščeni na podlagi opaznejše spremembe povprečnega naklona. V Preglednici 6 je z oznako »X« v potemljenih poljih prikazana razvrstitev višinskih razredov v nove razrede, Preglednica 7 pa prikazuje prostorsko porazdelitev dejavnika in normalizirane vrednosti novih razredov za sloj »naklonski potencial po višinskih pasovih«. Do razdelitev, ki sta prikazani v obeh preglednicah

R	N.m.v. (m)	PN (°)							R	N.m.v. (m)	PN (°)
		0-5	5-10	10-13	13-15	15-17	17-19	19-21			
1	< 99		X						14	1300-1399	X
2	100-199	X							15	1400-1499	X
3	200-299		X						16	1500-1599	X
4	300-399			X					17	1600-1699	X
5	400-499				X				18	1700-1799	X
6	500-599				X				19	1800-1899	X
7	600-699					X			20	1900-1999	X
8	700-799						X		21	2000-2099	X
9	800-899						X		22	2100-2199	X
10	900-999							X	23	2200-2299	X
11	1000-1099							X	24	2300-2399	X
12	1100-1199							X	25	2400-2499	X
13	1200-1299							X	26	2500-2599	X
									27	2600-2699	X
									28	2700-2799	X
									29	> 2800	X

Preglednica 6. Razporeditev razredov stometrskih višinskih pasov (R) glede na razrede povprečnih naklonov (PN) iz Preglednice 7.

Table 6. »Elevation classes« (R) and estimation of their susceptibility to debris-flow according to average slope angle in each class (PN, taken from the Table 7).

Razred	PN (°)	Razpon razreda po n.m.v. (m)	A (%)	N – Vrednost razreda po normalizaciji
1	0-5	100 – 199	7,60	0,00
2	5-10	0 – 99 in 200 – 299	19,17	0,14
3	10-13	300 – 399	14,96	0,29
4	13-15	400 – 599	23,35	0,43
5	15-17	600 – 699	8,67	0,57
6	17-19	700 – 899	11,53	0,71
7	19-21	900 – 1299	9,98	0,86
8	21-46	1300 – 2864	4,73	1,00

Preglednica 7. Razredi dejavnika »naklonski potencial po višinskih pasovih«.

Table 7. Classes of factor »Slope angle potential« by elevation classes.

(Preglednici 6 in 7), smo prišli po številnih poskusih. Za izbrano delitev ni direktne utemeljene osnove, ki bi temeljila na terenskih opazovanjih, vendar se je v nadaljnjih modeliranjih pokazala kot smiselna.

Energetski potencial vodotokov

Energetski potencial vodotokov (EPV) je lastnost, ki je v primeru modeliranja pojavov drobirskih tokov vezana na linijske pojave – vodotoke in predstavlja poenostavitev vplivnega dejavnika oblikovanosti struge, po kateri potencialno poteka transport materiala. Določitev EPV za posamezno lokacijo (celico) je bila sestavljena iz več korakov. Najprej smo za vsak segment površinskega vodotoka (ravno linijo, ki predstavlja približek naravne linije vodotoka) izračunali povprečni naklon (padec vzdolž segmenta). V naslednjem koraku smo z uporabo kernelske metode (*angl. Kernel Density*) razporedili vrednost izračunanega povprečnega padca po površini okoli vsakega segmenta vodotoka na območju oddaljenosti 100 metrov od linije. Pripisana vrednost obravnavanega elementa, v danem primeru je to povprečni padec vzdolž elementa, je pri kernelski metodi izražena s prostornino pod porazdelitveno krivuljo, vrednosti pa se z oddaljenostjo od elementa zmanjšujejo (ESRI, 2006). Vrednosti izračunanega rastrskega sloja smo razvrstili v 9 razredov glede na spremembe trendov v porazdelitvi frekvenca pojavljanja (*angl. Natural Breaks – Jenks*; metoda naravnih mej). Metoda naravnih mej določi meje med skupinami podatkov na osnovi prevojev v trendih. Mejo določi tam, kjer se pojavijo relativno velike razlike med paroma sosednjih vrednosti, zato meje razredov niso enakomerno razporejene. Kernelska metoda se uporablja tako pri določanju vpliva cestnega omrežja na habitate kot tudi uporabnosti infrastrukturnih vodov v naseljih (ESRI, 2006). Pripisano vrednost elementa, ki je v danem primeru linijsko izražen pojav transportne poti materiala, smo uporabili kot utežitveni dejavnik za razvrstitev posameznih delov vodotokov v razrede glede na njihov prispevek k potencialnemu transportu materiala. Enota, ki določa EPV je $^{\circ}/m^2$ in predstavlja očno prispevka posameznega dela struge k trans-

Preglednica 8. Razredi dejavnika »energetski potencial vodotokov«.

Table 8. »Stream energy potential« classes and estimation of their susceptibility to debris-flow.

Razred	Razpon razreda po gostoti ($^{\circ}/m^2$)	A (%)	N – Vrednost razreda po normalizaciji
1	0 – 0,0138	88,72	0,000
2	0,0138 – 0,048301	5,23	0,125
3	0,048301 – 0,089703	2,68	0,250
4	0,089703 – 0,134554	1,58	0,375
5	0,134554 – 0,182856	0,92	0,500
6	0,182856 – 0,238057	0,50	0,625
7	0,238057 – 0,310509	0,26	0,750
8	0,310509 – 0,424363	0,09	0,875
9	0,424363 – 0,883227	0,02	1,000

portu materiala drobirskih tokov v odvisnosti od padca vzdolž toka površinske vode. Preglednica 8 prikazuje prostorsko porazdelitev dejavnika EPV in normalizirane vrednosti novih razredov za sloj »energetski potencial vodotokov«.

Oddaljenost od površinskih vod

Glede na velikost celice rastrskih slojev in poznavanja dinamike drobirskih tokov smo razvrstili vpliv oddaljenosti od površinskih vod na razrede po 25 metrov. Največji vpliv ima najbližji razred, to je oddaljenost do 25 metrov od vodotoka. Vpliv se nato premosorazmerno zmanjšuje do oddaljenosti 75 metrov, ko se izniči. V slednji razred sodijo celice, ki so oddaljene od vodotoka za več kot 75 m. Razredi vplivnega dejavnika »oddaljenost od površinskih vod« in njihove vrednosti po normalizaciji so predstavljene v preglednici 9.

Preglednica 9. Razredi dejavnika »oddaljenost od površinskih vod«.

Table 9. »Distance to surface waters« classes and estimation of their susceptibility to debris-flow.

Razred	Razpon razreda glede na oddaljenost (m)	A (%)	Vrednost razreda po normalizaciji
1	0 – 25	6,46%	1,00
2	25 – 50	4,08%	0,67
3	50 – 75	4,75%	0,33
4	> 75 m	84,71%	0,00

Ukrivljenost površja

Na osnovi digitalnega modela višin z ločljivostjo 25 metrov smo izločili konkavne oblike terena, ki ustvarjajo primerne pogoje za potovanje drobirskih tokov kot dvo ali več faznih tokov. Vplivni dejavnik ukrivljenosti je razdeljen na dva tipa površja, na konveksna in ravna (ali neukrivljena) območja, kjer tok ne gravitira v neko skupno točko, temveč se razliva, ter na konkavna območja, kjer tok gravitira v kanal ali strugo. Informacijski sloj ima binarni značaj, torej le dve vrednosti, 0 za prvi tip in 1 za slednji tip območij. Razredi vplivnega dejavnika »ukrivljenosti« in njihove vrednosti po normalizaciji so predstavljene v preglednici 10.

Preglednica 10. Razredi dejavnika »ukrivljenost površja«.

Table 10. »Slope curvature« classes and estimation of their susceptibility to debris-flow.

Razred	Ukrivljenost površja	A (%)	Vrednost razreda po normalizaciji
0	konveksna in ravna območja ($-0,5 > X < -8$)	91,68	0
1	konkavna območja ($-0,5 < X > -8$)	8,32	1

Modeliranje dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov

Pri izdelavi modela dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov smo uporabili metodo linearne utežene vsote (VOOGD, 1983). Določitev uteži posameznih vplivnih prostorsko-časovnih dejavni-

kov je bila zaradi pomanjkanja podatkov oziroma preskromne in heterogene populacije opazovanih dogodkov zahtevna naloga. Razponi uteži dejavnikov kot vhodni podatek pri izračunu modelov so bili določeni na podlagi strokovne ocene, kakovost modelov pa je bila ocenjena na podlagi populacije recentnih in historigičnih pojavov drobirskih tokov. Omejitve ekspertnega pristopa so predvsem subjektivni vpliv tako na izbiro vplivnih prostorsko-časovnih dejavnikov kot tudi njihovega prispevka v modelu oziroma določitev uteži, zaradi česar je posamezna izbira ali odločitev težje opravičljiva. Ti oviri smo poskušali zaobiti z dobrim terenskim poznavanjem razmer, dolgoletnimi izkušnjami s področja raziskovanj pobočnih masnih premikov in njihovega praktičnega reševanja ter z izračunom več kombinacij uteži dejavnikov (Preglednica 11). Vsi rastrski informacijski sloji, ki podajajo lastnosti dejavnikov vpliva, imajo ločljivost celice 25×25 metrov, enako ločljivost imajo tudi vsi izračunani modeli napovedi.

Na osnovi opravljenih prostorskih analiz in predhodnih izkušenj pri dosedanjih analizah pojavov pobočnih masnih premikov smo določili vpliv posameznih prostorskih dejavnikov na dovzetnost za pojavljanje drobirskih tokov. Tako smo posamezni prostorski dejavnik razdelili na razrede, te pa nato normalizirali z enačbo 1.

$$NRV = \frac{1 - (RV - \min)}{\max - \min} \quad (1)$$

kjer NRV pomeni novo razvrščeno vrednost, RV predstavlja staro razvrščeno vrednost (zaporedno št. razreda), vrednost \max predstavlja največjo vrednost vhodnega podatka (t.j. število razredov), vrednost \min predstavlja najmanjšo staro vrednost (običajno 0) in število 1 predstavlja razpon vrednosti za NRV . Minimalna vrednost je bila postavljena na vrednost 0, ki pa v primeru modela utežene vsote ne predstavlja izločilnega dejavnika. Z nor-

malizacijo je bila zagotovljena enakost podatkov pred postopkom modeliranja. Kvaliteta modelov je bila preverjena s testnim nizom šestnajstih pojavov drobirskih tokov, ki so se že zgodili.

Pri izračunu modela dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov smo uporabili metodo linearne obtežene vsote (prirejeno po Voogd, 1983). Rezultat modela je standardizirana stopnja verjetnosti nastanka pojava, ki v danem primeru izraža stopnjo dovzetnosti za pojavljanje drobirskega toka, izračunana po enačbi 2:

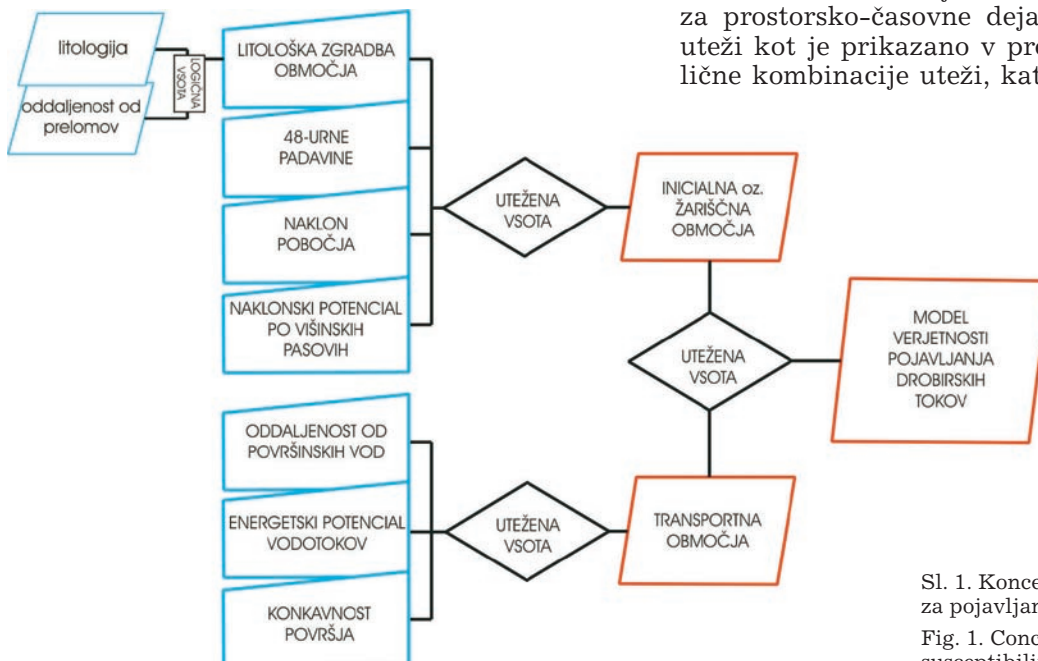
$$H = \sum_{i=1}^n w_j \times f_{ij}, \quad (2)$$

kjer H predstavlja standardizirano relativno vrednost stopnje dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov (0 – 1), w_j predstavlja končno utež spremenljivke in f_{ij} predstavlja zvezno ali diskretno vrednost spremenljivke. Opisna vrednost dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov je bila določena šele po reklasifikaciji vrednosti v posameznem modelu.

Model je naravnan izključno v prostorsko napoved dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov in se ne loteva časovnih okvirov nevarnosti njihovega pojavljanja, prav tako pa ne napoveduje količine materiala, ki lahko po posameznem transportnem območju pripotuje na območja akumulacije.

Slika 1 prikazuje konceptualni model dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov, na podlagi katerega so bili izračunani matematični prostorski modeli. Inicialni vplivni dejavniki so bili po načelu linearne utežene vsote združeni v **inicialni informacijski sloj**. Po enakem postopku je bil izdelan **transportni informacijski sloj**. Oba sloja sta bila nato združena v končno napoved, ponovno z upoštevanjem njune pomembnosti za nastanek drobirskega toka. Različne kombinacije uteži posameznih dejavnikov so rezultirale v različnih modelih napovedi, ki so opisani v nadaljevanju.

Na osnovi izkušenj in referenčne literature smo za prostorsko-časovne dejavnike določili ocene uteži kot je prikazano v preglednici 11. Za različne kombinacije uteži, katerih skupna vsota je



Sl. 1. Konceptualni model dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov

Fig. 1. Conceptual debris-flow susceptibility model.

Preglednica 11. Razpon uteži za prostorsko-časovne dejavnike.

Table 11. »Weights intervals« for each of the spatio-temporal factor.

Prostorsko-časovni (P-Č) dejavnik	Oznaka	Razpon uteži dejavnika	Korak
Litologija združena z oddaljenostjo od prelomov in narivov	LITOTEK	0,14 – 0,23	0,03
48-urne padavine	PAD48	0,14 – 0,23	0,03
Naklon pobočja	NAKL	0,14 – 0,23	0,03
Naklonski potencial po višinskih pasovih	NMVPAS	0,06 – 0,15	0,03
Energetski potencial vodotokov	EPV100	0,14 – 0,23	0,03
Oddaljenost od površinskih vod	ODD_PV	0,10 – 0,19	0,03
Ukrivljenost površja	UKRIV	0,09 – 0,18	0,03

bila vedno 1 (oziroma 100 %) smo izračunali 672 linearnih modelov. Zaradi lažje primerjave so bili vsi modeli razdeljeni na 100 po površini enako velikih razredov, nato pa evalvirani s pomočjo testnega vzorca šestnajstih pojavov drobirskih tokov, ki so se razprostirali na 6385-ih celicah.

Pri izbranem pristopu evalvacije modelov dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov se pojavi nevarnost pretreniranosti modela (*ang. overtrained* tudi *over-fitting model*), ki sicer zelo dobro napoveduje ali prikazuje testno populacijo, a je ob prenosu na druge populacije neuporaben oziroma manj uporaben. To oviro smo zaobšli s tremi varovalkami. Prva varovalka je bila velika heterogenost testne populacije drobirskih tokov, saj so nekateri pojavi med njimi zelo netipični predstavniki drobirskih tokov (npr. Ciprnik, Slano Blato in Kropa) in model uspešno napoveduje tudi te. Druga varovalka je bilo povprečenje uteži najboljših modelov, s čimer smo delno izločili potencialni vpliv pretreniranosti. Kot tretjo varovalko smo pri iskanju najprimernejšega(ih) modela(ov) uporabili tudi najbolj ugodno/idealno razmerje med površino območja, dovzetnega za pojavljanje drobirskih tokov in številom celic testnega niza na istem območju. Manjše, ko je bilo območje in več testnih celic, ki jih je zajemalo, večja je bila nevarnost pretreniranja modela (v statistiki napaka beta). V obratnem primeru, ko je bilo območje preširoko pa smo se soočili z neučinkovitostjo napovedi modela (v statistiki napaka alfa, ko je hipoteza dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov potrjena, čeprav v resnici ne drži).

Rezultati in razprava

Analiza 672-ih modelov dovzetnosti za pojav-

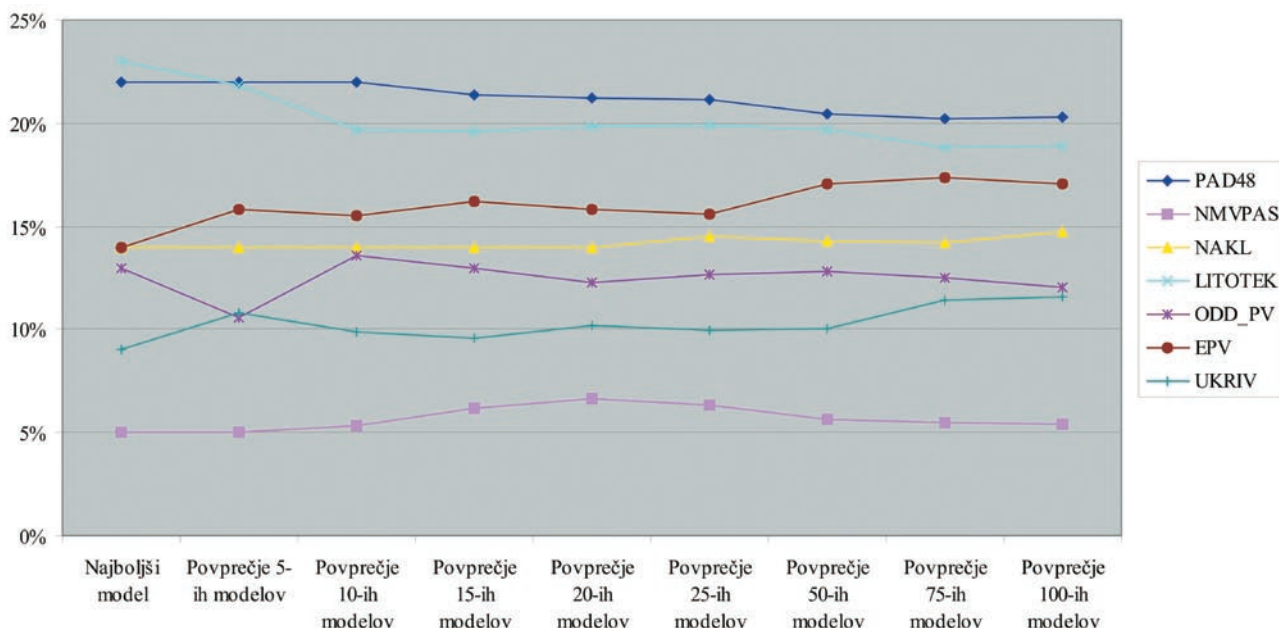
ljanje drobirskih tokov je pokazala, da so najpomembnejši dejavniki, ki vplivajo na pojavljanje drobirskih tokov, količina 48-urnih padavin, geološke lastnosti terena in energetski potencial vodotokov, nekoliko manj pomembni pa so naklon pobočij, oddaljenost od površinskih voda ter ukrivljenost terena. Preglednica 12 prikazuje povprečne vrednosti uteži prostorsko-časovnih dejavnikov, vključenih v modele dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov, slika 2 pa grafično prikazuje spremembe vrednosti uteži za posamezne dejavnike.

Na sliki 3 je prikazana porazdelitev deleža 6385-ih celic testnega niza drobirskih tokov za polovico območja Slovenije, kjer je verjetnost pojavov večja. Porazdelitev je prikazana za sto najbolj uspešnih modelov na območjih, ki pripadajo zgornji polovici dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov. Zaradi preglednosti in računske ekonomičnosti so deleži prikazani za razrede po 5 % površja. Na isti sliki je porazdelitev deleža celic testnega niza drobirskih tokov glede na razrede najustrežnejšega modela (POVP_100), izbrana iz povprečja stotih najuspešnejših modelov, prikazana z odebeljeno črto. Za model POVP_100 je najbolj očitno skok deleža drobirskih tokov v zadnjem razredu (35 % celic drobirskih tokov testnega niza), več kot 10 % deleža celic (več kot 2 × več od pričakovanega deleža) pa se nahaja še v treh razredih med 80 % in 95 %, v prvem (A (80–85 %)) slabih 16 %, v drugem (A (85–90 %)) 14 % in v tretjem (A (90–95 %)) slabih 12 %. Območje, ki je v Sloveniji dovzetno za pojavljanje drobirskih tokov obsega le predele, katerih naklon pobočja je večji od 5°. Vse celice testnega niza, ki ležijo na območjih z naklonom manjšim od 5°, teh je 24 oziroma 0,38 % površine testnega niza drobirskih tokov, obravnavamo kot napako modela(ov). Po-

Preglednica 12. Povprečne vrednosti uteži prostorsko-časovnih dejavnikov, vključenih v modele dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov. Razlaga prostorsko-časovnih dejavnikov (P-Č dejavniki) je podana v preglednici 11.

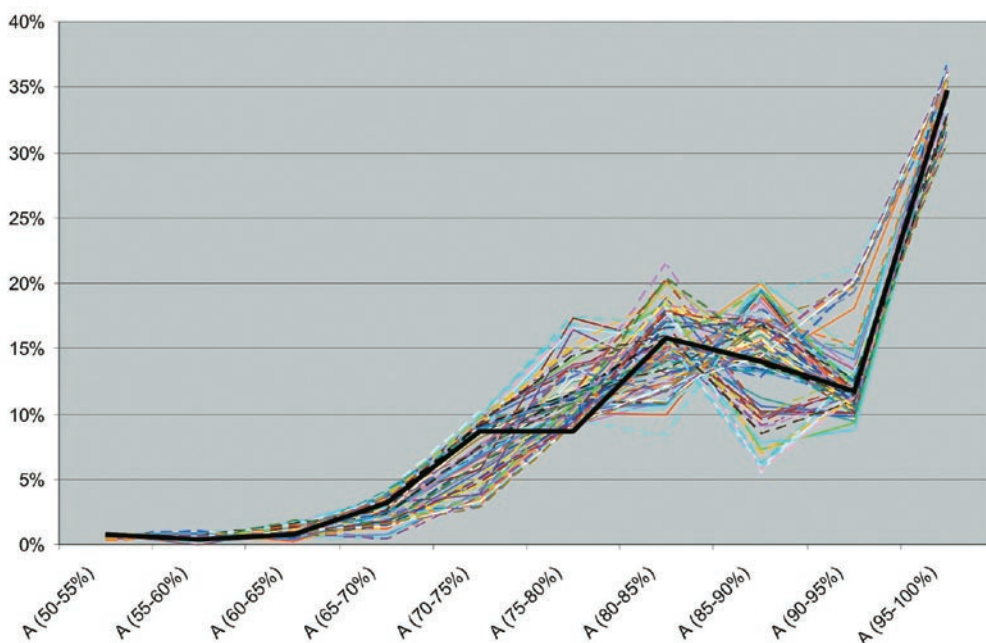
Table 12. Average values of weights of spatio-temporal factors, used for the debris-flow susceptibility models calculations. Explanation of spatio-temporal factors (P-Č dejavniki) is given in the Table 11.

Modeli / P-Č dejavniki	IME	LITOTEK	PAD48	NAKL	NMVPAS	EPV100	ODD_PV	UKRIV
Najboljši model	NAJ	0,2300	0,2200	0,1400	0,0500	0,1400	0,1300	0,0900
Povprečje 5-ih modelov	POVP_5	0,2180	0,2200	0,1400	0,0500	0,1580	0,1060	0,1080
Povprečje 10-ih modelov	POVP_10	0,1970	0,2200	0,1400	0,0530	0,1550	0,1360	0,0990
Povprečje 15-ih modelov	POVP_15	0,1960	0,2140	0,1400	0,0620	0,1620	0,1300	0,0960
Povprečje 20-ih modelov	POVP_20	0,1985	0,2125	0,1400	0,0665	0,1580	0,1225	0,1020
Povprečje 25-ih modelov	POVP_25	0,1988	0,2116	0,1448	0,0632	0,1556	0,1264	0,0996
Povprečje 50-ih modelov	POVP_50	0,1970	0,2044	0,1430	0,0566	0,1706	0,1282	0,1002
Povprečje 75-ih modelov	POVP_75	0,1884	0,2024	0,1420	0,0544	0,1736	0,1252	0,1140
Povprečje 100-tih modelov	POVP_100	0,1889	0,2029	0,1472	0,0542	0,1706	0,1201	0,1161



Sl. 2. Grafični prikaz povprečnih vrednosti uteži prostorsko-časovnih dejavnikov, vključenih v modele dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov. Legenda prostorsko-časovnih dejavnikov je podana v preglednici 11.

Fig. 2. Visualisation of average weight values of spatio-temporal factors used to produce debris-flow susceptibility model (on axis X from left to right: best (over trained) model, average of 5, 10, 15, 20, 25, 50, 75, and 100 models). Explanation of factors' abbreviation is given in Table 11.



Sl. 3. Porazdelitev deleža celic testnega niza v zgornjih 50-ih odstotkih površja Slovenije (območja, ki pripada zgornji polovici dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov), razdeljenih na razrede po 5 % površja. Z odebeljeno črto je prikazana porazdelitev deležev drobirskih tokov po razredih za model POVP_100.

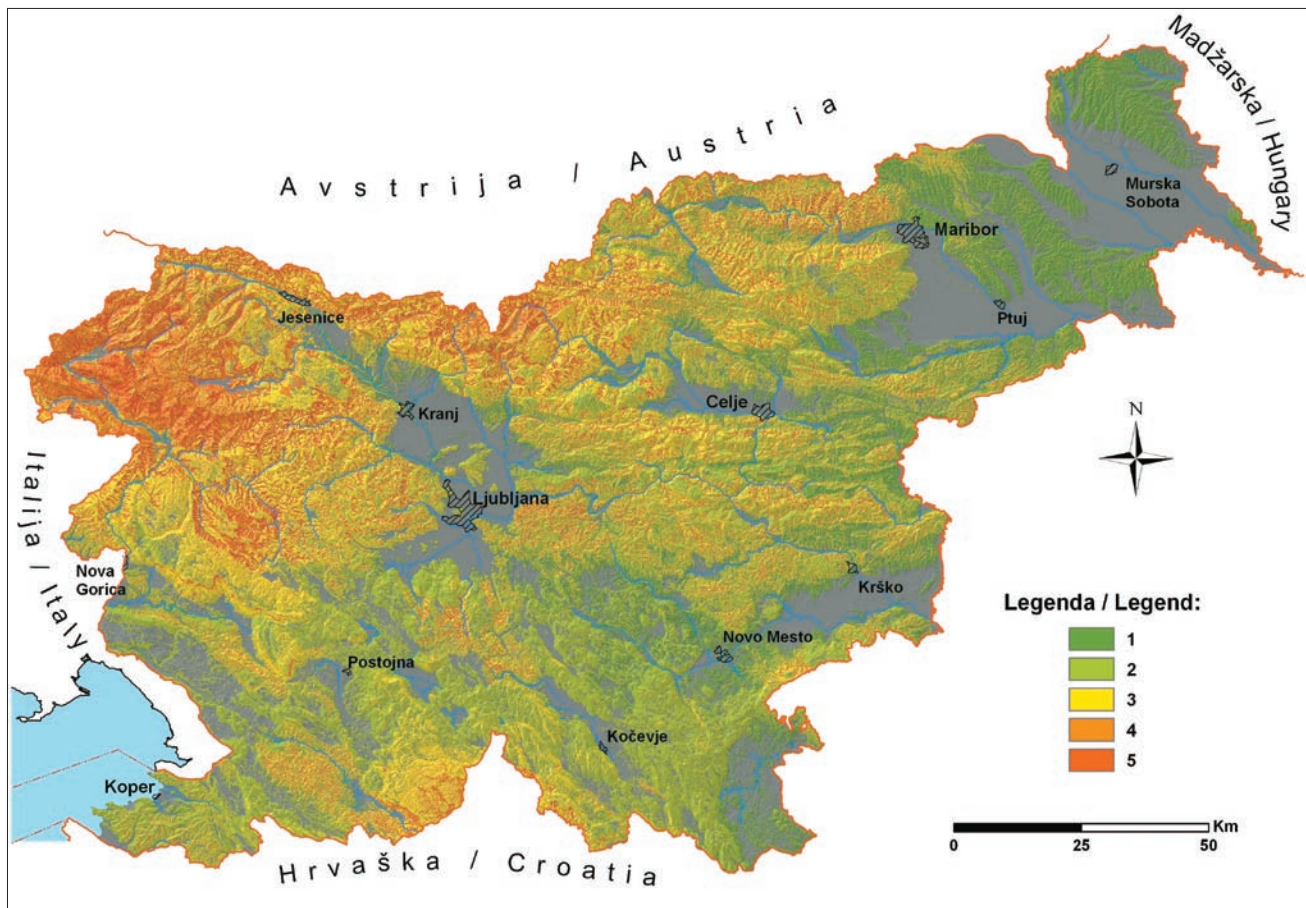
Fig. 3. Test sample area distribution in the upper 50 % of the Slovenian area (the half of the area where the debris-flow susceptibility is higher) divided into ten classes by 5 %. Bold line represents the debris-flow distribution for the chosen model titled POVP_100.

razdelitev deležev celic testnega niza drobirskih tokov je prikazana po razredih, katerih površina meri 5 % skupne površine.

Glede na omenjeno možnost pretreniranja modela smo se odločili, da kot najprimernejše uteži izberemo povprečje stotih najuspešnejših modelov dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov. Za najprimernejši model se je za najboljšega izkazal model POVP_100, prikazan na sliki 4, katerega prostorsko-časovni dejavniki so sledeči. Za najpomembnejši dejavnik so se izkazale 48-urne padavine, ki prispevajo dobrih 20 %, sledijo lastnosti kamnin v kombinaciji z vplivom tektonskih struktur, ki prispevajo slabih 19 %, 17 % prispeva dejavnik energetski potencial vodotokov, slabih 15 %

naklon pobočij, 12 % oddaljenost od površinskih vod, nekaj manj, 11,6 % ukrivljenost površja, najmanj pa nadmorska višina lokacije (5,4 %).

Model POVP_100, prikazan na sliki 4, podaja prostorsko napoved dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov v Sloveniji, kjer so območja z neznatno oziroma majhno dovzetnostjo za pojavljanje drobirskih tokov označena z zelenimi odtenki (razreda 1 in 2), območja s srednjo veliko dovzetnostjo z rumeno barvo (razred 3), območja z veliko z oranžno (razred 4) in območja z zelo veliko dovzetnostjo za pojavljanje drobirskih tokov z rdečo barvo (razred 5). Podrobnejši pogled odkrije, da predstavljajo rdeče obarvana območja poti premikanja materiala oziroma drobirskih



Sl. 4. Najboljši (in hkrati najrealnejši) model dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov v Sloveniji (POVP_100), pridobljen z linearnim modelom prostorsko-časovnih dejavnikov kot so opisani v preglednici 13. Oznake v legendi pomenijo dovzetnost za pojavljanje drobirskih tokov: 1 – neznatna; 2 – majhna; 3 – srednje velika; 4 – velika; 5 – zelo velika. Siva območja pripadajo površju Slovenije, kjer je dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov zanemarljiva.

Fig. 4. Most appropriate and real debris-flow susceptibility model for Slovenia (POVP_100) calculated from the linear function of spatio-temporal factors as described in Table 13. Values in the legend stand for the debris-flow susceptibility: 1 – insignificant; 2 – low; 3 – medium; 4 – high; 5 – very high. The grey areas belong to the areas in Slovenia where the debris-flow susceptibility is negligible.

tokov, torej transportna območja, kjer ima premikajoči se material dejansko največjo moč in predstavlja tam tudi največjo nevarnost za ogrožence. Oranžno in v manjši meri tudi rumeno označena območja predstavljajo predvsem območja nastanka/sprožitve, ki zaradi svojih geoloških in geomorfoloških lastnosti predstavljajo potencialni vir material, ki bi lahko v prihodnosti v obliki drobirskega toka potoval v dolino. Slednja območja predstavljajo le omejeno nevarnost za potencialne ogrožence, saj brez prisotnosti tran-

sportnih območij, večidel predstavljena z rdečo barvo, drobirski tokovi na teh območjih večjih razsežnosti ne morejo razviti.

Na podlagi lastnosti porazdelitve vrednosti modela, natančneje metode naravnih mej v porazdelitvi deleža površine celotnega območja glede na vrednost modela POVP_100 (porazdelitve vrednosti modela ne smemo zamenjati s porazdelitvijo površja raziskovanega območja na enake razrede po površini, kot je prikazano na slikah 3 in 4), smo model napovedi razdelili na šest razre-

Preglednica 13. Porazdelitev površine razredov dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov v Sloveniji za najprimernejši model (POVP_100). Stolpec »A« predstavlja delež površine razreda, »Vrednosti modela« podajajo razpon vrednosti modela POVP_100, ki se raztezajo med 0 in 1, »Dovzetnost za pojavljanje drobirskih tokov« opisno podaja dovzetnost za pojavljanje drobirskih tokov in »Delež drobirskih tokov« delež drobirskih tokov v razredu dovzetnosti za pojavljanje.

Razred	A (%)	Vrednosti modela	Dovzetnost za pojavljanje drobirskih tokov	Delež drobirskih tokov (%)
0	27,84	-	Zanemarljiva	0,38*
1	10,18	0 – 0,134	Neznatna	0,00
2	27,86	0,134 – 0,243	Majhna	0,96
3	19,48	0,243 – 0,353	Srednje velika	17,92
4	10,66	0,353 – 0,494	Velika	43,40
5	3,99	0,494 – 1,00	Zelo velika	37,35

Table 13. Debris-flow susceptibility classes area distribution in Slovenia for the POVP_100 model. Column »A« represents the proportion of the area, »Vrednosti modela« represents the interval of the POVP_100 model values that span from 0 to 1, »Dovzetnost za pojavljanje drobirskih tokov« descriptively represents the debris-flow susceptibility, and »Delež drobirskih tokov« represents the portion of the test sample pixels in each susceptibility class.

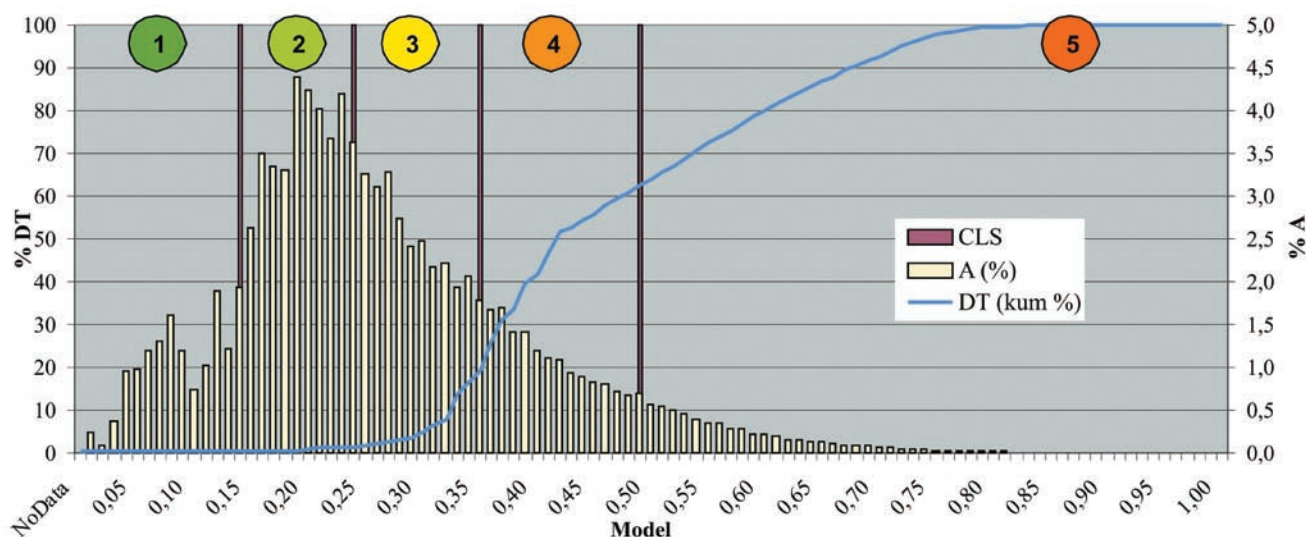
*0,38 % celic testnega niza drobirskih tokov se pojavlja na območjih, kjer ni možnosti nastanka opazovanih pojavov.

*0,38 % of the testing samples pixels are located in the areas where debris-flow occurrence in negligible.

dov dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov kot jih prikazuje preglednica 13. V najvišji, peti razred so bila uvrščena območja, kjer je bilo drobirskih tokov 9-krat več od pričakovanih, skupaj 37,3 %. Površina razreda predstavlja zgornje 4 % površin po dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov. V razred z veliko dovzetnostjo za pojavljanje drobirskih tokov s površino 10,6 % je bilo uvrščenih 43,4 % vseh drobirskih tokov, v razred s srednjo dovzetnostjo za pojavljanje drobirskih tokov, ki obsega 19,5 % površine, pa je bilo uvrščenih 18 % drobirskih tokov. Na območjih razreda z majhno dovzetnostjo za pojavljanje drobirskih tokov, ki obsega 28 % površine se pojavlja slab odstotek drobirskih tokov, na območjih z neznatno dovzetnostjo za pojavljanje drobirskih tokov pa se na 10-ih % površine drobirski tokovi ne pojavljajo. Pojavljanje drobirskih tokov v razredu, kjer je dovzetnost za njihovo pojavljanje zanemarljiva, se pojavlja 0,4 % drobirskih tokov, kar je najverjetneje posledica generaliziranega merila. Kot je razvidno iz iste preglednice, model POVP_100 zelo dobro napoveduje potenci-

alna območja pojavljanja drobirskih tokov, saj se na slabih 15 % območja pojavlja kar 80,7 % drobirskih tokov, na 34 % območja pa kar 98,7 % drobirskih tokov. Slika 5 prikazuje kumulativno porazdelitev celic testnega niza drobirskih tokov (DT (kum %)) ter porazdelitev deleža površine celotnega območja glede na vrednost modela napovedi (A %). Na sliki 5 so označeni tudi razredi dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov (obarvani krogi s številkami) in meje med njimi (CLS). Preglednica 14 prikazuje rezultate testa χ^2 (Davis, 1986), ki statistično potrjuje ustreznost razdelitve modela POVP_100 na šest razredov dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov ($\chi^2 = 443,068$ in $p < 0,000$).

Kljub dejstvu, da se enote, ki so najbolj dovzetne za pojavljanje drobirskih tokov, pojavljajo v različnih delih Slovenije, tako v njenem W in N delu kot tudi v NE delu, je možno zaslediti skupne imenovalce. Poleg sedimentov, ki so že po svoji sestavi sorodni drobirskim tokovom in so značilni za gorate predele N in W Slovenije (morene, pobočni gruščji, vršaji), so enote, dovzetne na pojav-



Sl. 5. Kumulativna porazdelitev celic testnega niza drobirskih tokov (DT (kum %)) ter porazdelitev deleža površin, brez območij z naklonom pod 5° , glede na vrednosti modela POVP_100 (A %). Razredi dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov so prikazani z obarvanimi krogi s številčnimi oznakami in meje med njimi z linijami (CLS). Številčne oznake v krogih predstavljajo razrede dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov: 1 – neznatna; 2 – majhna; 3 – srednja; 4 – velika; 5 – zelo velika. Razred 0 je izločen iz prikaza zaradi podrobnejšega prikaza ostalih 5 signifikativnih razredov.

Fig. 5. Cumulative distribution of the debris-flow test sample pixels (DT (kum %)) and distribution of the area (A %) (areas where slope angle is below 5° are excluded) according to values of the POVP_100 model. Debris-flow susceptibility classes are represented with coloured circles and numbers while boundaries between classes are represented with vertical lines (CLS). Values in the circles stand for the debris-flow susceptibility: 1 – insignificant; 2 – low; 3 – medium; 4 – high; 5 – very high. The class 0 (negligible susceptibility) is excluded from the figure due to better representation of other five classes.

Preglednica 14. χ^2 test ustreznosti reklasifikacije modela POVP_100 na 6 razredov. Stolpec »Dejansko (D)« podaja opazovan delež celic testnega niza drobirskih tokov glede na razred dovzetnosti za pojavljanje, stolpec »Pričakovano (P)« pa pričakovani delež celic testnega niza drobirskih tokov glede na površino razreda dovzetnosti za pojavljanje, če bi model povsem naključno podajal verjetnost pojavljanja.

$\chi^2 = 443,0689$ $df = 5$ $p < 0,000000$				
Razred	Dejansko (D)	Pričakovano (P)	D-P	$\chi^2 = (D-P)^2/P$
0	0,3759	27,8358	-27,4599	27,0891
1	0,0000	10,1771	-10,1771	10,1771
2	0,9554	27,8578	-26,9024	25,9798
3	17,9170	19,4799	-1,5629	0,1254
4	43,3986	10,6619	32,7367	100,5158
5	37,3532	3,9876	33,3656	279,1817
Σ	100,0	100,0	0,0	443,0689

Table 14. Chi square (χ^2) test of model POVP_100 classification into 6 classes. Column "Dejansko (D)" represents observed proportion of the test sample pixels in each susceptibility class, column "Pričakovano (P)" represents expected proportion of the test sample pixels in each susceptibility class, if the distribution would be random.

ljanje drobirskih tokov v goratih predelih, sestavljene iz ploščatih karbonatov z vključki laporja in roženca. Dovzetne na pojavljanje drobirskih tokov v Karavankah in zahodni osrednji Sloveniji so poleg karbonatnih z vključki tudi flišne plasti, plasti glinovca, meljevca, peščenjaka, laporja in tudi piroklastični sedimenti. V NE delu Slovenije, na območjih magmatskih in metamorfnih kompleksov, pa so za pojavljanje drobirskih tokov dovzetni tonalit, blesniki, gnajsi, granit z diabazom in filitoidni skrilavec.

Ker je velika dovzetnost za pojavljanje drobirskih tokov v Sloveniji vezana le na manjši del površja, ki znaša po rezultatih izbranega modela okoli 15 % in ker so razmerja med deležem celic testnega niza ter površjem območij, ki so bolj podvržena pojavom drobirskih tokov, najugodnejša za zgornje štiri razrede, ki pokrivajo 20 % površja (glej sliko 3), smo se odločili, da kot referenčni okvir za določitev oziroma izračun razpona napake modela POVP_100 izberemo najboljšo (pretreniranje) in najslabše (posplošitev) razmerje (DT/A) med deležem plazov na petini za drobirske tokove najbolj podvrženega ozemlja Slovenije in površjem, ki ga to območje pokriva, torej 20 %. Razmerje na petini ozemlja smo izbrali, da bi v določitev napak vključili tudi mejna območja med razredoma srednja in velika dovzetnost

za pojavljanje drobirskih tokov. Vrednosti uteži prostorsko-časovnih dejavnikov so prikazane v preglednici 15.

Razmerje DT/A za pretreniran model znaša 4,26, za posplošen model pa 3,36. Povprečje razmerij za sto najuspešnejših modelov znaša 3,84. Za najboljši model znaša delež celic testnega niza drobirskih tokov 76,23 %, delež natančne površine zgornjih štirih razredov (80 – 100 %) 19,81 %, njuno razmerje pa znaša 3,85, kar je zelo blizu povprečja razmerij za sto najuspešnejših modelov.

Slika 6 prikazuje kumulativno porazdelitev celic testnega niza drobirskih tokov glede na sto po površini enakih razredov za tri modele, pretreniranje, posplošitev in POVP_100. Iz poteka krivulj je jasno razvidna večja uspešnost pretreniranega modela in slabša uspešnost posplošenega modela od idealnega modela POVP_100. Za primerjavo med kakovostjo modelov smo izbrali nevtralno klasifikacijo, zato smo vse modele razdelili na 100 razredov z enakimi površinami, kar je omogočilo njihovo primerjanje.

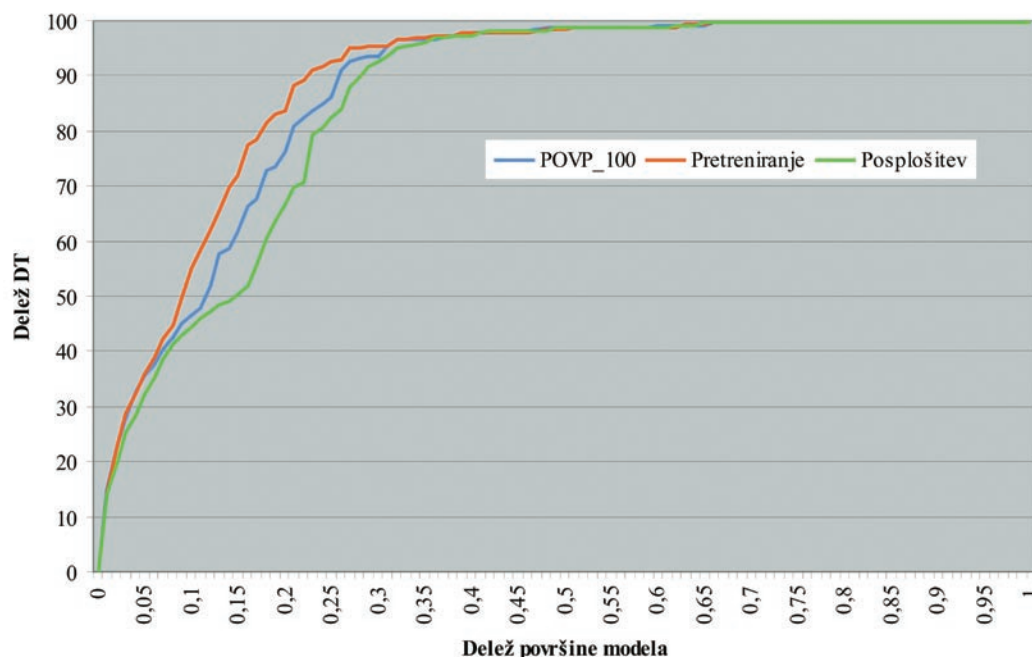
Na sliki 7 so prikazane velikosti napake modela POVP_100 oziroma odstopanj vrednosti tega modela od pretreniranega (ERR PR) in od posplošenega (ERR PO) modela. Z linijo je prikazana največja absolutna vrednost napak obeh ekstremov,

Preglednica 15. Vrednosti uteži prostorsko-časovnih dejavnikov za model z najboljšim in najslabšim razmerjem med deležem celic testnega niza drobirskih tokov in natančno površino zgornjih štirih razredov (80–100 %) ter za model POVP_100.

Razlaga prostorsko-časovnih dejavnikov (P-Č dejavniki) je podana v preglednici 11.

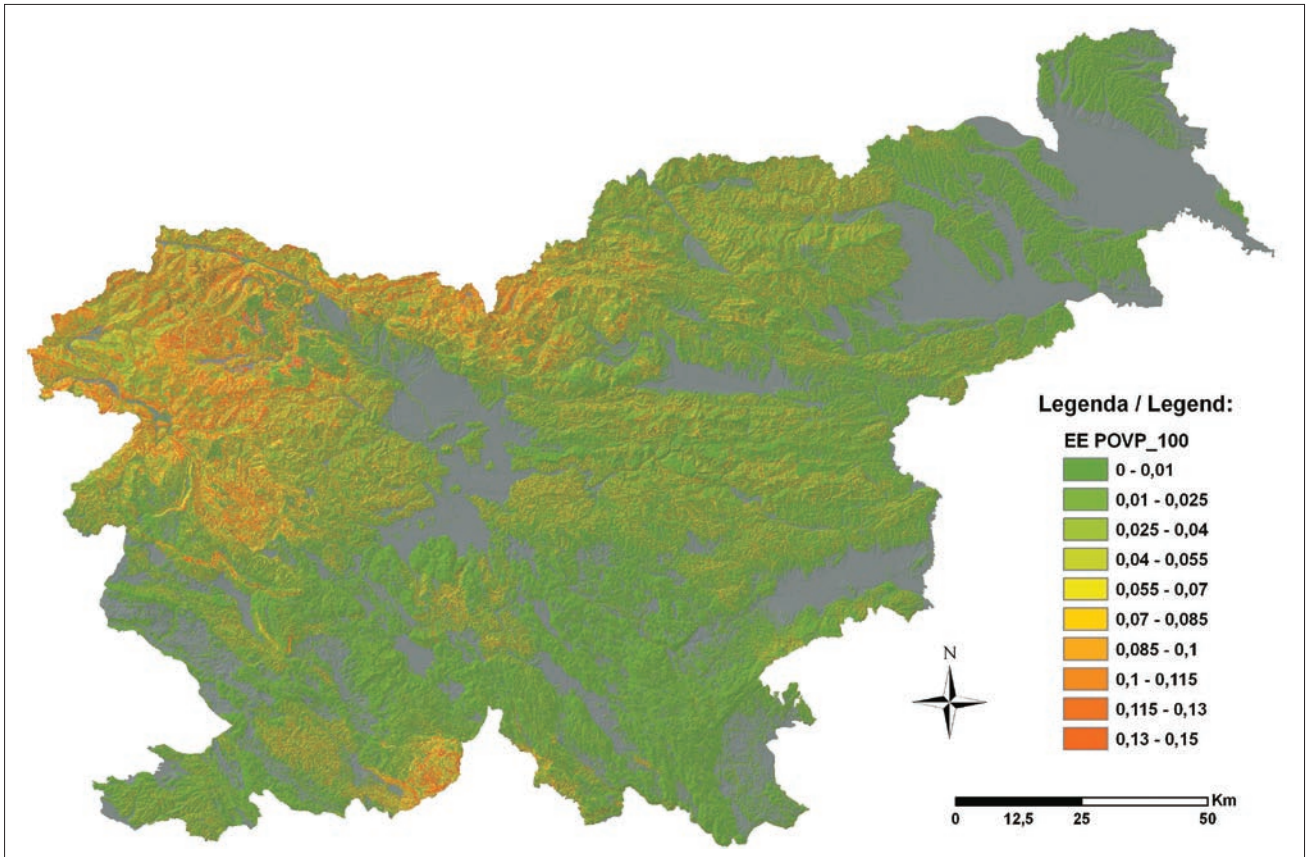
Table 15. Weights values of spatio-temporal factors for models with the best (over fitted model), the worst (generalisation model) DT (test sample pixel proportion in top four classes) over A (exact proportion of the area of top four classes) ratio and for POVP_100 model. Explanation of spatio-temporal factors (P-Č dejavniki) is given in the Table 11.

P-Č dejavniki	LITOTEK	PAD48	NAKL	NMVPAS	EPV100	ODD_PV	KONK	DT (%)	A (%)	DT/A
Pretreniranje	0,200	0,220	0,170	0,080	0,140	0,100	0,090	83,65	19,65	4,26
Posplošitev	0,140	0,220	0,140	0,050	0,140	0,160	0,150	65,73	19,57	3,36
POVP_100	0,189	0,203	0,147	0,054	0,171	0,12	0,116	76,32	19,81	3,85



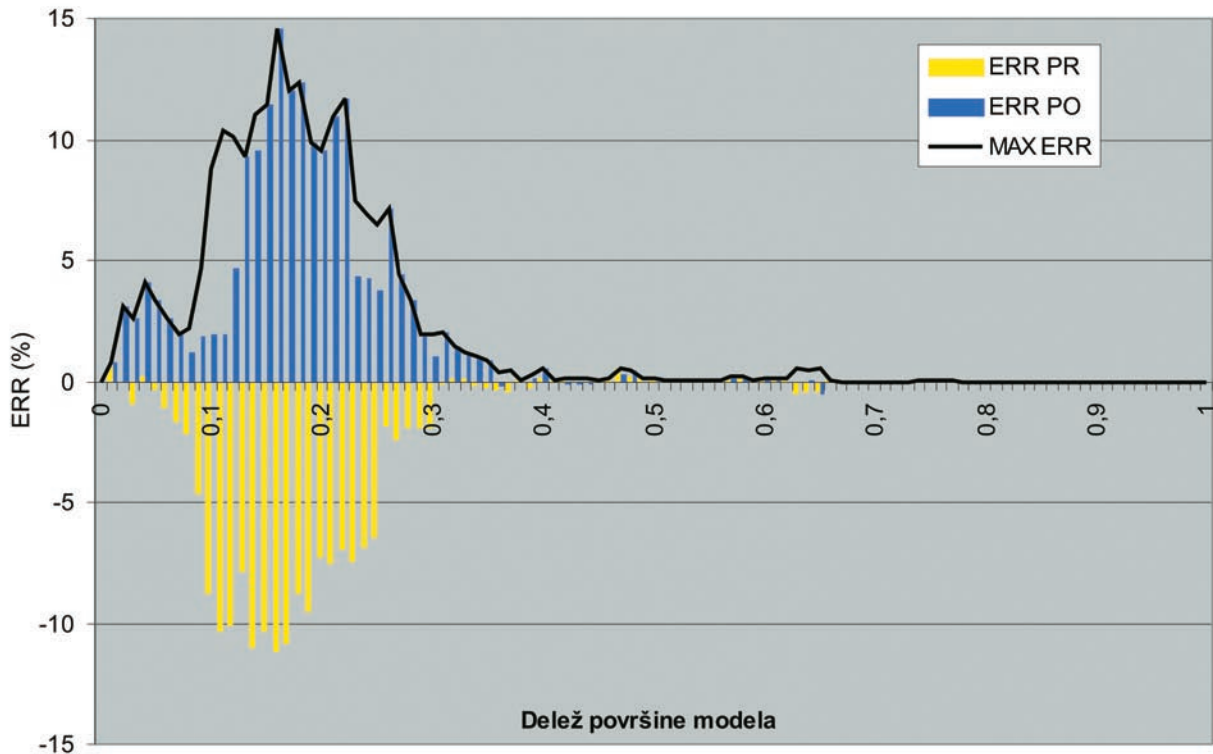
Sl. 6. Kumulativna porazdelitev celic testnega niza drobirskih tokov glede na sto po površini enakih razredov za tri modele, pretreniranje, posplošitev in POVP_100. Iz poteka krivulj je jasno razvidna večja uspešnost pretreniranega modela in slabša uspešnost posplošenega modela od idealnega modela POVP_100.

Fig. 6. Cumulative distribution of the debris-flow test sample pixels according to 100 classes with equal area for three models: over fitting (pretreniranje), generalisation (posplošitev), and POVP_100. The distribution curves indicate that over fitted and generalised models represent higher and lower success rate respectively.



Sl. 7. Velikosti napake modela POVP_100 oziroma odstopanj vrednosti tega modela od pretreniranega (ERR PR) in od posplošenega (ERR PO) modela glede na sto razredov z enakimi površinami. Z linijo je prikazana največja absolutna vrednost napak obeh ekstremnih modelov (MAX ERR).

Fig. 7. Rates of error for the model POVP_100, which are for each of 100 classes with equal area, calculated from the difference between values of POVP_100 and over fitted (ERR_PR) and generalised model (ERR_PO). Black line shows the maximum absolute difference (error) of both extreme models (MAX_ERR).



Sl. 8. Ocenjena napaka modela dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov v Sloveniji z imenom POVP_100.

Napaka je bila ocenjena na podlagi največjega odstopanja modela POVP_100 od pretreniranega in posplošenega modela.

Fig. 8. Estimated error for the model POPV_100 that shows debris-flow susceptibility for Slovenia. The error was estimated from the maximum difference between values of POVP_100 and over fitted and generalised model.

ki služi za oceno zaupanja v model dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov v Sloveniji. Največje napake modela POVP_100, katerih vrednosti znašajo nad 0,1, se pojavljajo v pasu med 79-im in 88-im razredom med stotimi po površini enakimi razredi, na katere je razdeljeno območje analize. Največja napaka znaša 0,146 in se pojavlja v 85-em razredu, ki je razvrščen v razred velike dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov. Večja večjih napak sodi v razred velike dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov, manjši pa v razred srednje dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov. Slika 8 podaja prostorski prikaz napake modela POVP_100.

Pregled prostorskega pojavljanja napak modela POVP_100 pokaže, da so območja z večjo napako večinoma vezana na hribovita območja, ki jih tvori skladnat dachsteinski apnenec s prehodi v dolomit, masivni debeložrnati dolomit in apnenec, pobočni grušč ter plasti skrilavega glinovca, meljevca, ploščastega apnenca z roženci, laporja, drobe, peščenjaka, konglomerata, breče in tufa. Na območjih z večjo napako se pojavlja manj padavin in pobočja z nakloni med 15° in 33°.

Zaključki

Drobirski tokovi so kompleksni pojavi, katerih naravo pojavljanja in gibanja je težko napovedovati in modelirati, kar je posledica podvrženosti različnim vplivnim dejavnikom, katerih lastnosti se prostorsko in časovno zelo spreminjajo. Izbrani pristop določitve vpliva prostorsko-časovnih dejavnikov na pojavljanje drobirskih tokov z izračunom linearnega modela napovedi predstavlja zgolj grob približek dejanskemu stanju v naravi. Kljub dejstvu, da iskanje idealnega modela ni nikoli končano, pa je pragmatičen pristop, ki smo ga izbrali za izdelavo modela iz naslova prispevka, enostaven, robusten, hiter in stroškovno smisel. Izbrana napoved dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov v Sloveniji v merilu 1 : 250.000 je prva kompleksnejša analiza določitve ogroženosti pred drobirskimi tokovi na Slovenskem ozemlju. Omogoča, da za izločena oz. najbolj ogrožena območja Slovenije izvedemo podrobnejše analize na osnovi podrobnega kartiranja terena in vršajev, kar lahko izvedemo z uporabo v tem članku opisanega postopka modeliranja, seveda z drugačnimi utežmi vplivnih dejavnikov.

Zahvale

Pričujoča študija je bila v okviru Ciljnih raziskovalnih projektov (M2-0144 – Ocena ogroženosti zaradi delovanja drobirskih tokov) sofinancirana s strani Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije, Uprave Republike Slovenije za zaščito in reševanje, ki deluje v okviru MORS, in z lastnimi sredstvi Geološkega zavoda Slovenije. Avtorji se zahvaljujejo nosilcu projekta prof. dr. Matjažu Mikošu za kritične pripombe ter vsem sodelavcem, ki so kakor koli pomagali pri izdelavi analiz ali pa so s svojim znanjem in izkušnjami svetovali pri nastanku prispevka.

Literatura

- ANDERSON, S. A. 1995: Analysis of rainfall-induced debris flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121: 544–552.
- ALZATE, A. B. E., GUEVARA, C. & VALERO, J. A. M. 1999: Zonation on a large scale of mass movement hazards, using the GIS. *Proceedings of the Nineteenth Annual ESRI User Conference*. 1–23.
- ARCHETTI, R. & LAMBERTI, A. 2003: Assessment of Risk due to Debris Flow Events. *Natural Hazard Review*, 4/3: 115–125.
- ARSO, 2003: 50-letna povratna doba 48-urnih padavin, obdobje: 1961–2000 (digitalni prostorski podatek), Agencija Republike Slovenije za okolje.
- ARSO, 2005: Evropsko okoljsko informacijsko in opazovalno omrežje. – Agencija Republike Slovenije za okolje, Ministrstvo za okolje in prostor, Ljubljana. (<http://nfp-si.eionet.europa.eu/Dokumenti/GIS/>, 2005)
- BARDOU, E., NIGGLI, M. & MUSY, A. 2003: The role of snow in the generation of debris flow in small watersheds of the European Alps. *Geophysical Research Abstracts*, 5.
- BARDOU, E., & DELALOYE, R. 2004: Effects of ground freezing and snow avalanche deposits on debris flows in alpine environments. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4: 519–530.
- BENDA, L. E. & CUNDY, T. W. 1990. Predicting deposition of debris flows in mountain channels. *Canadian Geotechnical Journal*, 27: 409–417.
- BUSER, S.: Geološka karta Slovenije 1 : 250.000 v tisku.
- CARSON, R. 2002: Take the a-frame: debris flow during 1996 rain-on-snow event, Blue Mountains, Washington. *Proceedings of the Geological Society of America Cordilleran Section 98th Annual Meeting*, May 13–15, 2002.
- CERIANI, M., CROSTA, G., FRATTINI, P. & QUATTRINI, S. 2000: Evaluation of hydrogeological hazard on alluvial fans. *INTERPRAEVENT 2000 Villach*, 2: 213–225.
- CHRISTENSEN, M., BARTELT, P. & GRUBER, U. 2009: Hazard Mapping and GIS: Simulating Avalanche, Debris Flow and Rock-fall. *Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research* (http://www.wsl.ch/forschung/forschungsprojekte/rapid_mass_movements/index_EN, 20. 2. 2009)
- COMMITTEE ON ALLUVIAL FAN FLOODING, 1996: Alluvial Fan Flooding. *Water Science and Technology Board, Commission on Geosciences, Environment, and Resources, National Research Council, National Academy Press, Washington*, 1–36.
- CRUDEN, D. M. & VARNES, D. J. 1996: Landslide types and processes. V: Turner A.K.; Shuster R. L. (ur), *Landslides: Investigation and Mitigation*. *Transp Res Board, Spec Rep 247*: 36–75.
- DAI, F., LEE, C. F. & WANG, S. 1999: Analysis of rainstorm-induced slide-debris flows on natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Engineering Geology*, 51: 279–290.

- DAVIS, J. C. 1986: Statistics and data analysis in geology. John Wiley & Sons (New York) 1–646.
- DELMONACO, G., LEONI, G., MARGOTTINI, C., PUGLISI, C. & SPIZZICHINO, D. 2003: Large scale debris-flow hazard assessment: a geotechnical approach and GIS modelling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, European Geosciences Union, 3: 443–455.
- DI, B. F., CHEN, N. S., CUI, P., LI, Z. L., HE, Y. P. & GAO, Y. C., 2008: GIS-based risk analyses of debris flow: an application in Sichuan, southwest China. *International Journal of Sediment Research*, 23/ 2: 138–148.
- DIETRICH, W. E., & MONTGOMERY, D. E. 1998: Shalstab. A digital terrain model for mappingshallow landslide potential. NCASI (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement) Technical Report, February 1998, 1–29.
- GUINAU, M., VILAJOSANA, I. & VILAPLANA, J. M. 2007: Gis-based debris flow source and runoff susceptibility assessment from DEM data – a case study in NW Nicaragua. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7: 703–716.
- EMBLETON-HAMANN, C. 1997: Austria. v: Embleton, C. & Embleton-Hamann, C. (ur.), *Geomorphological Hazards of Europe. Developments in Earth Surface Processes (Elsevier)* 5: 1–30.
- ESRI, 2006: ArcGIS Desktop Help. ESRI.
- FANNIN, R. J. & ROLLERSON, T. P. 1993. Debris flows: some physical characteristics and behavior. *Canadian Geotechnical Journal* 30: 71–81.
- FIORILLO, F. & WILSON, R. C. 2004: Rainfall induced debris flows in pyroclastic deposits, Campania (southern Italy). *Engineering Geology*, 75: 263–289.
- FLEMING, R. W., ELLEN, S. D. & ALGUS, M. A. 1989: Transformation of dilative and contractive landslide debris into debris flow – an example from Marin County, California. *Engineering Geology*, 27: 201–223.
- GURS 2005: Digitalni model višin – DMV25, 1998–2005 (Digitalni model višin z ločljivostjo celice 25 × 25 m). Geodetska uprava Republike Slovenije, Ljubljana.
- JEŽ, J., MIKOŠ, M., TRAJANOVA, M., KUMELJ, Š. & BAVEC, M. 2008: Vršaj Koroška Bela – Rezultat katastrofičnih pobočnih dogodkov. *Geologija (Ljubljana)* 51/2: 219–227.
- KOMAC, M. 2005: Intenzivne padavine kot sprožilni dejavnik pri pojavljanju plazov v Sloveniji (*Rainstorms as a landslide-triggering factor in Slovenia*). *Geologija (Ljubljana)* 48/2: 263–279.
- KOMAC, M., RIBIČIČ, M., ŠINIGOJ, J., KRIVIC, M. & KUMELJ, Š. 2005: Analiza pojavljanja plazov v Sloveniji in izdelava karte verjetnosti plazenj : fazno poročilo za leto 2005. Arhiv Geološki zavod Slovenije (Ljubljana): 1–138.
- KOWALSKI, J. & McELWAIN, J. 2008: Two-phase debris flow modeling. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 10 EGU General Assembly 2008, EGU 2008.
- LAN, H. X., ZHOU, C. H., WANG, L. J., ZHANG, H. Y. & LI, R. H. 2004: Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China. *Engineering Geology*, 76: 109–128.
- LIN, P. S., LIN, J. Y., HUNG J. C. & YANG, M. D. 2002: Assessing debris-flow hazard in a watershed in Taiwan, *Engineering Geology*, 66: 295–313.
- MAINALI, A. & RAJARATNAM, N. 1994: Hydraulics of debris flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120: 104–123.
- MARCHI, L. & D'AGOSTINO, V. 2001: Estimation of debris-flow magnitude in the eastern Italian Alps: Data collection and analysis. *Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science*, 26/9: 657–663.
- MAZENGARB, C. 2004: Map 3, Hobart - Potential Debris- Flow Hazard. Tasmanian Landslide Hazard Series. Mineral Resources Tasmania, Department of Infrastructure Energy and Resources, Hobart.
- MELELLI, L. & TARAMELLI, A. 2004: An example of debris-flows hazard modeling using GIS. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4: 1–12.
- MERGILI, M. 2008: r.debrisflow, version 1.3. User's manual and model outline. A model framework for simulating mobilization and movement of debris flow. Institute of Geography, University of Innsbruck, Austria.
- MIKOŠ, M. 2001: Značilnosti drobirskih tokov. *Ujma (Ljubljana)* 14/15: 295–299.
- MILLER, D. J. & BURNETT, K. M. 2008: A probabilistic model of debris-flow delivery to stream channels, demonstrated for the Coast Range of Oregon, USA. *Geomorphology*, 94:184–205.
- NAKAGAWA, H., TAKAHASHI, T. & SATOFUKA, Y. 2000: A debris flow disaster on the fan of the Harihara River, Japan. *Proceedings of the 2nd International conference on debris flows hazard mitigation: mechanics, prediction and assessment*, Taipei, 16–18 August, Rotterdam, Balkema, edited by Wiczorek and Naeser, 193–201.
- NAKAGAWA, H., TAKAHASHI, T. & SATOFUKA, Y. 2001: An analysis of the debris flow disaster in the Harihara River basin. In: *Particulate Gravity Currents. Spec. Publ. Int. Ass. Sediment.*, 31: 45–64.
- OLDNALL, R. 2004: Risk Assessment of Natural Hazards, Munich Re Insurance Company, Auckland, 9 str. (http://www.rmla.org.nz/publications_2004/OldnalPaper.doc, 2. 2. 2009)
- PETKOVŠEK, B. 2000/2001: Zemeljski plaz Stože pod Mangartom – Geološke značilnosti plazov. *Ujma (Ljubljana)* 14/15: 98–101.
- PODOBNIKAR, T. & SZÉKELY, B. 2008: Poskus analize potencialno nevarnih vršajev z DMR-jem. V: PERKO, D. (Ur.), ZORN, M. (Ur.), RAZPOTNIK, N. (Ur.), ČEH, M. (Ur.), HLADNIK, D. (Ur.), KREVS, M. (Ur.), PODOBNIKAR, T. (Ur.), REPE, B. (Ur.), ŠUMRADA, R. (ur.). *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2007–2008, (GIS v Sloveniji, 9)*, Ljubljana, Založba ZRC, 73–81.
- POLJAK, M. 2000: Strukturno-tektonska karta Slovenije, merilo: 1 : 250.000. Arhiv Geološki zavod Slovenije, Ljubljana.
- POZZONI, M., AMBROSI, C., SALVETTI, A., THÜRING, M. & GERMANN-CHIARI, C. 2009: Conceptual debris

- flow modeling for risk assessment at the municipal scale. SUPSI, Manno. (www.ist.supsi.ch/Content/main/uploaded/img/progetti/dfwalk_big.pdf, 12. 1. 2009)
- R2 Resource Consultants, 2005: Upper Nehalem Watershed Analysis. Oregon Department of Forestry (Salem) 1–231.
- RIBIČIČ, M. 2002: Inženirska geologija. Skripta. Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, (Ljubljana): 1–30.
- RICKENMANN, D. & ZIMMERMAN, M. 1993: The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis. *Geomorphology*, 8: 175–189.
- SKABERNE, D. 2001: Predlog slovenskega izrazoslovja pobočnih premikanj-pobočnega transporta. *Geologija* (Ljubljana) 44/1: 89–100.
- SODNIK, J. & MIKOŠ, M. 2006: Estimation of magnitudes of debris flows in selected torrential watersheds in Slovenia (*Ocena magnitud drobirskih tokov v izbranih hudourniških območjih v Sloveniji*). *Acta geogr. Slov.*, (Ljubljana) 46/1: 93–123.
- SWANSON, F. J., JOHNSON, S. L., GREGORY, S. V. & ACKER, S. A. 1998. Flood disturbance in a forested mountain landscape. *BioScience* 48/9: 681–689.
- TAKAHASHI, T. 1991: Debris Flow. IAHR/AIRH, Balkema, 1–165.
- TOYOS, G., ORAMAS DORTA, D., OPPENHEIMER, C., PARESCHI, M. T., SULPIZIO, R. & ZANCHETTA, G. 2008: GIS-assisted modelling for debris flow hazard assessment based on the events of May 1998 in the area of Sarno, Southern Italy. Part I: Maximum run-out. *Earth Surface Processes and Landforms*, John Wiley & Sons, Ltd., 33/11: 1693–1708.
- VOOGD, H. 1983: Multicriteria evaluation for urban and regional planning, Pion Ltd.: London, 119–121.
- WANG, C., ESAKI, T., XIE, M. & QIU, C. 2006: Landslide and debris-flow hazard analysis and prediction using GIS in Minamata–Hougawachi area, Japan. *Environmental Geology*, 51: 91–102.
- WEN, B. P. & AYDIN, A. 2005: Mechanism of a rainfall-induced slide-debris flow: constraints from microstructure of its slip zone. *Engineering Geology*, 78: 69–88.
- ZHOU, G., ESAKI, T., MITANI, Y., XIE, M. & MORI, J. 2003: Spatial probabilistic modeling of slope failure using an integrated GIS Monte Carlo simulation approach. *Engineering Geology*, 68: 373–386.

Vloga javnega inštituta geološkega zavoda pri preprečevanju geohazardov in zmanjševanju njihovih posledic

Contribution of public Geological Survey to prevention and mitigation of geohazards

Marko KOMAC

Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ul. 14, p.p. 2552, SI-1001 Ljubljana, Slovenija
e-mail: marko.komac@geo-zs.si

Prejeto / Received 15. 12. 2008; Sprejeto / Accepted 24. 2. 2009

Ključne besede: geološke nevarnosti, geohazard, preprečevanje, geološki zavod, družba
Key words: geohazard, prevention, mitigation, geological survey, GSO, society

Izvleček

Družbe so bile od nekdaj izpostavljene vplivom narave. Nobena skupina dejavnikov ni bolj vplivala na njihov razvoj kot prav geološki procesi in z njimi povezane geološke nevarnosti (geohazardi). Dandanes zahtevata preprečevanje geohazardov in zmanjševanje njihovih posledic kompleksne pristope, ti pa zahtevajo strateško ravnanje, ki vključuje vse segmente družbe, od odločevalcev do končnih uporabnikov in strokovnjakov. Upravljanje z geohazardi je javno dobro, zato mora biti strokovni del voden s strani neprofitne javne organizacije, pravni okvir pa mora zagotoviti država. Glavni namen institucije javnega geološkega zavoda je zbiranje, upravljanje in interpretiranje geoloških podatkov za dobrobit najširše javnosti, igra pa tudi pomembno vlogo v skoraj vseh korakih procesa upravljanja (ali obvladovanja) z geohazardi, od izobraževanja, ozaveščanja javnosti do raziskav, zbiranja, obdelave in interpretacije podatkov ter nudenja podpore pri sprejemanju odločitev. Tradicija inštituta in zavezanost k sistematičnemu zbiranju podatkov in graditvi znanja o naravnih procesih zagotavlja zanesljivo in neodvisno podporo pri ugotavljanju in razlagi naravnih pojavov in procesov (seizmična aktivnost, masni premiki, onesnaženje voda in tal, presežek ali pomanjkanje sledilnih elementov v tleh, posedanje, pogrezanje in nabrekanje tal, uhajanje naravnih plinov ipd.), pri razumevanju procesov sprožitve, dinamike, transporta, interakcije z mediji in živimi organizmi ter pri napovedovanju bodočih scenarijev s poudarkom na oceni nevarnosti teh procesov za človeka. Vrednost znanja o dinamičnem okolju, ki nas obdaja, se v Sloveniji kaže vedno pogosteje, a njegov pomen v vsakodnevni praksi ni dovolj upoštevan.

Abstract

From the early history of civilisation societies have been exposed to external factors. Probably no other factors have influenced the development of societies and cultures more than geologically driven hazards or geohazards. With the evolvement of societies also the approaches to solving problems, related to geohazard, have developed. The complexity of mitigation and response measurements that tackle the contemporary geohazard problems demands a long-term strategic approach that has to incorporate all segments of the society, from stake-holders and end-user groups to the experts. The management of geohazards is a public good and as such needs to be governed by a non-profit public body. The common mission of almost all geological surveys is to gather, manage and interpret geologically related data for a wider public welfare. Geological surveys as public institutions represent a key role in almost all components of the geohazard management process, from education and research, to data acquisition, processing, interpretation and decision support issues. With its knowledge regarding natural processes gathered through decades GSO offers reliable and independent support in assessing and describing the phenomena (seismic activities, mass wasting, water and soil pollution, excess or lack of trace elements in the soil, ground subsidence or heave, gaseous emanations and more), understanding the processes of activation, dynamics, transport, interaction with media and living organisms, and predicting the possible scenarios in the future with emphasis on human exposure to given phenomena. Despite the fact that the value of the knowledge of the dynamic environment we live in is being tested literally on daily basis in Slovenia, its inclusion in everyday practice is still relatively negligible.

Uvod

Zaradi dogodkov, povezanih z večjim številom človeških žrtev in z ogromno materialno škodo, ki smo jim priče v zadnjih nekaj letih, bi morali tudi najbolj nejeverni segmenti današnje družbe pri-

znati, da večanje poseljenosti našega planeta zahteva večjo skrb tako za okolje kot tudi za človeka, ki to okolje poseljuje. Skozi človeško zgodovino so se civilizacije bolj ali manj uspešno spopadale z (ne)obvladljivimi geološkimi nevarnostmi kot so plazovi, poplave, pomanjkanje virov pitne vode,

povečanimi koncentracijami neželenih snovi v tleh (kot so soli, težke kovine, sledilni elementi ipd.), erozijo in posedanjem ali nabrekanjem podlage. Z večanjem kompleksnosti družbe se je povečala tudi interakcija med človeškim bivalnim prostorom in območji z večjo verjetnostjo neželenih geoloških pojavov. V literaturi se uporablja tudi izraz geološko pogojene nevarnosti (JURKOVŠEK, 2001; BUDKOVIČ, 2002; BUDKOVIČ et al., 2002; BAVEC et al., 2005; ĐUROVIČ & MIKOŠ, 2006). Najučinkovitejši pristop k zmanjševanju geoloških nevarnosti je kontinuirano sistematično zbiranje geoloških podatkov ter nato njihovo analiziranje, pravilno upravljanje in interpretiranje. V luči dejstva, da je bivalni prostor z vsemi svojimi pritiklinami javno dobro, je najbolj smiselno upravljanje z njim skozi javne službe in inštitute.

Prispevek poskuša odgovoriti na naslednja vprašanja: Kakšne geološke nevarnosti so prisotne v Sloveniji? Kakšna je vloga instituta javnega geološkega zavoda (v nadaljevanju IJGZ) pri preventivnem varovanju prebivalstva pred geološkimi nevarnostmi in pri uspešnem odpravljanju njihovih posledic? Kaj so prednosti in kaj slabosti IJGZ? Kakšna vloga igra pri tem država? Je smiselno ohranjati načelo javnih geoloških podatkov kot javno dobro? Kakšna je praksa IJGZ v članicah Evropske unije? Prispevek poskuša sistemsko umestiti IJGZ v proces upravljanja s tveganji ob nesrečah in v njem določiti vlogo(e) IJGZ.

Izpostaviti je treba, da se prispevek osredotoča zgolj na dojetje naslovne tematike z vidika človeka in človeškega razumevanje geološkega časa. Obravnava vzrokov, kakršni koli že so, periodičnosti in časovnih dimenzij globalnih ter podnebnih sprememb, je izven okvira tega prispevka.

Metodologija

Geološke nevarnosti in naravne nesreče

Dogodki, ki jih človeštvo imenuje naravne nesreče, dokazujejo, da je Zemlja več kot le neživ sistem, ki nas obdaja. V tem sistemu igrajo zelo pomembno vlogo geološki procesi, na katere lahko živa bitja zanemarljivo malo vplivamo. Taki dogodki so božični cunami leta 2004, potresi v Pakistanu in Indiji leta 2005, v Iranu 2003 in na Kitajskem maja 2008, vročinska vala v Evropi poleti 2003 in 2006, uničujoči plazovi na Filipinih meseca februarja 2008 in nenazadnje vsem dobro znane podnebne spremembe s številnimi orkani. Po podatkih oddelka za naravna tveganja iz pozavarovalnice München (NatCatSERVICE, 2007) je 277 večjih naravnih dogodkov v nekaj več kot petdesetih letih terjalo 1,75 milijona človeških življenj in 1.350 milijard evrov škode, od katere je bila zavarovana le petina. Da so geološki procesi in njih posledice eden ključnih povzročiteljev globalnih sprememb, jasno priča diagram, prikazan na sliki 1. Diagram prikazuje najbolj pereče probleme sodobne družbe, procese, ki vodijo v njihovo udejanjanje in tri glavne posredne povzročitelje problemov, (1) geološke procese, med katere sodijo

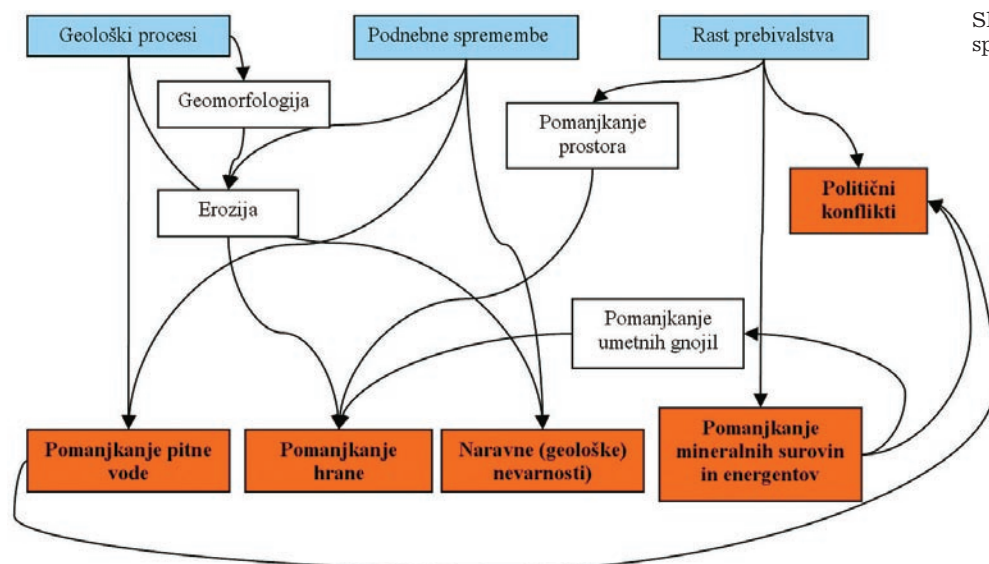
tako geološke nevarnosti, kot tudi geološke danosti, ki pogojujejo pridobivanje energentov, mineralnih surovin in vode, (2) podnebne spremembe in (3) rast prebivalstva. Diagram se podrobneje ne dotika sociološkega vidika problematik.

V Sloveniji smo priča podobnim okoliščinam. Po podatkih Statističnega urada Republike Slovenije (SURS, 2008) je v obdobju med letoma 1994 in 2006 skupna škoda zaradi elementarnih nesreč, v katere so vključene tudi naravne nesreče, znašala okoli 1,04 milijarde evrov nerevalorizirane vrednosti škod (revalorizirane vrednosti bi dale boljše, dejansko sliko stroškov, ki bi bili zaradi letne inflacije nedvomno še večji od nerevaloriziranih). Škoda geoloških (tudi geološko pogojenih) nesreč (potresi, plazovi, suše in poplave) je znašala 611 milijonov evrov (tudi nerevalorizirane vrednosti škod). Podrobnejši vpogled v porazdelitev déležev škod po vzrokih (tipih nesreč) prikazuje slika 2. Iz prikaza je razvidno, da predstavlja škoda, nastala zaradi suše skoraj tretjino (30,5 %), škoda zaradi poplav 15 %, škoda zaradi pojavov drsenja tal in snega 9 % in škoda zaradi potresov slabe 4 % celotne škode. Kljub splošnemu mnenju, da prva dva tipa nesreč nista povezana z geološkimi danostmi območja, pa je realnost dejansko ravno obratna. Pojavljanje suše in poplav, povezanih z dvigom podzemne vode, je odvisno od količinskega stanja in nivoja podzemne vode, pa tudi od njene kakovosti, zato lahko ti dve vrsti škode uvrstimo med geološke nevarnosti. Zanimiv je podatek, da je škoda zaradi potresov skoraj pol manjša od škode, ki jo povzročajo plazena, kljub dejstvu, da so slednji lokalno omejeni, potresi pa imajo precej večji prostorski vpliv. Ne glede na to, podatki o škodah kažejo na veliko pogostejše, tako časovno (kar ni presenetljivo) kot tudi prostorsko, pojavljanje plazov v Sloveniji.

Geološke nevarnosti so del širše skupine naravnih nesreč, v katere sodijo še vremensko pogojene in epidemološke nesreče. Pojem elementarnih nesreč pa poleg naravnih obsega tudi antropogene nesreče, torej povzročene s strani človeka. Z vidika v Sloveniji prisotnih geoloških nesreč geološke danosti našega ozemlja na žalost niso najbolj ugodne, saj so prisotni skoraj vsi tipi geoloških nevarnosti, izjeme so le z vulkani, večim ledom in morskimi procesi povezane geološke nevarnosti.

Geološka nevarnost (geohazard) je definirana kot naravno ali antropogeno geološko stanje, ki lahko vodi v škodo ali neobvladljivo tveganje, s čimer potencialno ogroža življenje in lastnino (ALEXANDER, 1993). Poleg zgoraj naštetih vrst geoloških nevarnosti, ki so v Sloveniji pogostejše prisotne in jih statistika vključuje v letopise, pa seznam geoloških nevarnosti dopolnjujejo še mnoge druge nevarnosti, od katerih so nekatere v Sloveniji možne, a z antropološkega vidika niso tako pogoste.

Spodnji seznam geoloških nevarnosti je prirejen po dokumentu delovne skupine za geološke nevarnosti v okviru organizacije EuroGeoSurveys (EGS 2008a) in dopolnjen. Podčrtano so označene nevarnosti, ki se lahko pojavljajo v Sloveniji, z zvezdico pa tiste nevarnosti, na pojavljanje katerih imajo podnebne spremembe velik vpliv.



Sl. 1. Gonilni dejavniki globalnih sprememb

Geološke nevarnosti (geohazardi) so:

1. Geodinamične nevarnosti:

- 1.1. potresi, vključno s povzročenimi cunami, likvefakcijo tal ali sedimentov, povzročeni mi jačnji tresenja tal, razpokost zemeljske površine in njenega prelamljanja,
- 1.2. vulkanske nevarnosti, vključno s toki lave, usedanja pepela ali drugih vulkanskih sedimentov, piroklastični tokovi, laharji, izbruhi CO/CO₂ in drugih plinov, podorov vulkanskih struktur,
- 1.1.1. cunami, ki jih lahko povzročijo seizmični dejavniki, vulkanski izbruhi, skalni podori v fjordih, podmorski plazovi in različni podori (npr. vulkanskih struktur).

2. Splošne geološke nevarnosti:

- 2.1. erozija / sedimentacija* (vpliv na obalna območja; spremembe v bilancah poti sedimentov zaradi graditve jezov)
- 2.2. poplavljanje obale* (običajno v povezavi s poplavljanjem kontinentov, dviganje gladine morij);
- 2.3. plazovi, skalni podori* na kopnem in sočasni pojavi kot so cunami ali začasne zajezitve,
- 2.4. plazovi in podori pod morjem (podmorski del vulkanskih otokov, aluvialnih vršajev, kontinentalnih pobočij) in sočasni pojavi cunami,
- 2.5. pomanjkanje ali povečana koncentracija slednih elementov v tleh, sedimentih in podzemni vodi;
- 2.6. izhajanje plinov (radon, CO₂, CO, metan iz hidratov ali permafrosta...);
- 2.7. udori površja zaradi kraških procesov in drugih podzemnih prostorov kot posledica raztapljanja, razpokanosti kamninske mase, ali votlih oblik kot posledice toka lave;
- 2.8. krčenje in nabrekanje z glino bogatih sedimentov in tal*;
- 2.9. povečano posedanje nekonsolidiranih, mehkih sedimentov kot je na primer aluvij;
- 2.10. podori pogojno stabilnih sedimentov kot so na primer eolski sedimenti, nekateri netop-

ni ostanki tropskih sedimentov in nekateri sedimenti aridnih območij;

- 2.11. tajanje permafrosta.

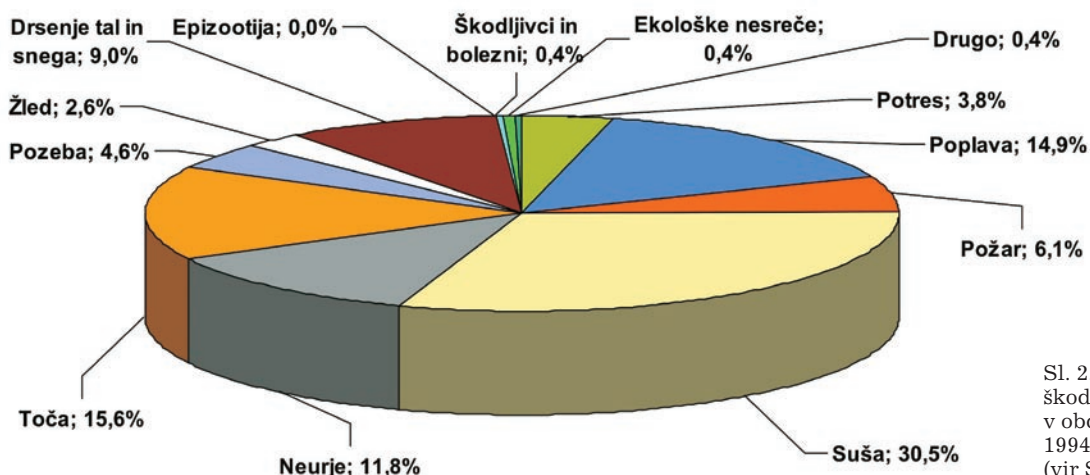
3. Hidrogeološke nevarnosti:

- 3.1. poplave, vezane na dvig podzemne vode*;
 - 3.2. dvigovanje in pogrezanje površja zaradi črpanja podzemne vode (ali prenehanja črpanja);
 - 3.3. suša (posredno vezana na pomanjkanje vode v tleh, nivoja podzemne vode ter zasoljevanja tal)*.
- ### 4. Nevarnosti, vezane na rudarjenje:
- 4.1. posedanje površja nad aktivnimi ali opuščenimi rudniki;
 - 4.2. udori površja zaradi antropogenih dejavnosti;
 - 4.3. reaktivacija prelomov zaradi dviga jamske vode v rudnikih;
 - 4.4. izpuščanje/izluževanje kislin in težkih kovin zaradi preteklega rudarjenja in nepremišljenega odlaganja jalovine ter rudarskih odpadkov.

Terminologija geoloških nevarnosti in naravnih nesreč

Na področju (geoloških) nevarnosti, naravnih nesreč, tveganj in škod se pojavlja številna in večsah precej različna terminologija. Ta v Sloveniji še ni dokončno definirana, saj manjka splošno soglasje o enotni rabi besedišča na tem področju. Eden glavnih problemov določitve univerzalnega besedišča na tem področju je dejavnik subjektivnosti, tako prizadetih, kot tudi strokovnjakov in močno posega na področje semantike in ontologije. Najbolj podrobno analizo slovenskega besedišča, tudi v primerjavi z jeziki sosednjih alpskih narodov, na področju nevarnosti in tveganj sta opravila Đurovič in Mikoš (2006).

Za razumevanje vloge IJGZ pri upravljanju z geološkimi nevarnostmi je smiselno razložiti soodvisnost med ogroženci in njihovo ranljivostjo na eni ter geološkimi procesi in geološkimi nevarnostmi na drugi strani. Večina objektov ali dru-



Sl. 2. Porazdelitev deležev škod po tipih nesreč v obdobju med letoma 1994 in 2006 (vir SURS, 2008).

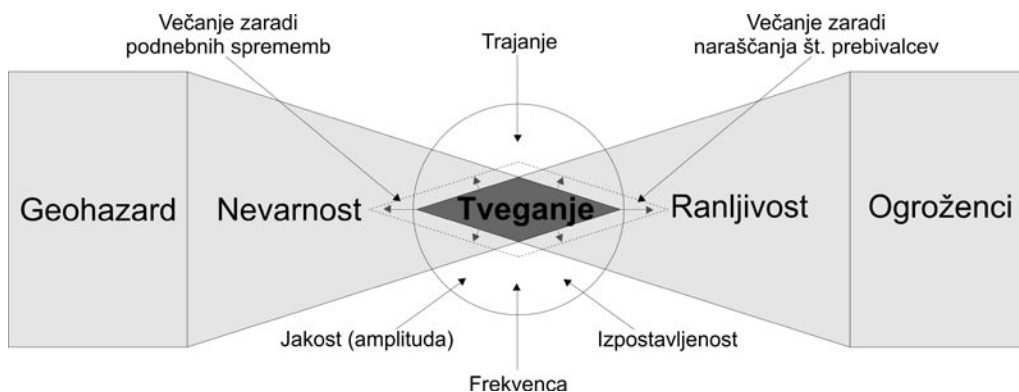
gih opazovanih elementov je ranljiva na zunanje vplive, zato jih imenujemo ogroženci. Ti elementi so postavljeni v nek specifičen prostor in čas. Nevarni dogodki (nevarnosti) se dogajajo v prostoru in času z različno močjo, frekvenco, trajanjem itd. Do tveganja pride le, ko se segmenta nevarnosti in ranljivosti prekrivata v prostoru in času. Slika 3 zelo nazorno prikazuje odvisnost med nevarnostjo in ranljivostjo. Območje tveganja se nenehno povečuje zaradi globalnih sprememb (vsaj v zadnjem obdobju, gledano izključno z antropološkega vidika), med katere štejemo podnebne spremembe in naraščanje števila prebivalcev. Prve vplivajo na jakost, pogostost in delno tudi trajanje pojavov, večanje števila prebivalcev pa povečuje pritiske na rabo prostora, tudi tistega, ki je bolj ranljiv v odnosu do geoloških nevarnosti. Ko se ogroženost realizira, go dejansko nastane škoda ali so prisotne žrtve, govorimo o nesreči. V primeru obravnave geoloških procesov govorimo o geološki nevarnosti in nato o naravni nesreči.

Slovenska zakonodaja s področja geoloških nevarnosti in naravnih nesreč

Slovenska zakonodaja, ki ureja področje naravnih nesreč je razdeljena na več krovnih zakonskih aktov, od katerih je nedvomno najpomembnejši Zakon o varstvu pred naravnimi in drugimi nesrečami (ZVNDN, Ur. l. RS 64/94, 33/00, 87/01, 52/02, 41/04, 28/06), področje geoloških nevarnosti pa urejajo tudi Zakon o vodah (ZV-1, Ur. l. RS 67/02, 110/02, 2/04, 10/04, 41/04, 57/08), Zakon o

odpravi posledic naravnih nesreč (ZOPNN, Ur. l. RS 75/03, 98/05, 90/07, 102/07), Zakon o temeljnih geološke dejavnosti, pomembne za vso državo (ZTGDPD, Ur. l. SFRJ 63/90, Ur. l. RS – stari 10/91, Ur. l. RS 17/91, 13/93, 66/93). Zakon o varstvu okolja (ZVO-1, 41/04, 17/06, 20/06, 28/06, 49/06, 66/06, 33/07, 57/08, 70/08) ureja problematiko nesreč z okoljskega vidika, saj tudi nesreče obravnava kot okoljske nesreče, povzročene s strani človeka. Področje smotrnega ravnanja s prostorom urejajo Zakon o urejanju prostora (ZÜreP-1, Ur. l. RS 110/02, 8/03, 58/03, 33/07), Zakon o prostorskem načrtovanju (ZPNačrt, Ur. l. RS 33/07, 70/08), Zakon o graditvi objektov (ZGO-1, Ur. l. RS 110/02, 97/03, 41/04, 45/04, 46/04, 47/04, 62/04, 93/05, 111/05, 120/06, 126/07).

Trenutno se slovenska praksa na žalost bolj usmerja v odpravljanje posledic naravnih nesreč, čemur bi najverjetneje pritrdilo tudi primerjanje višine sredstev iz proračuna, namenjenih sanaciji naravnih nesreč z višino sredstev, namenjenih za preventivne ukrepe. Med zakonskim podlagami, ki urejajo (so urejale) aktivnosti, povezane z odpravljanjem posledic naravnih nesreč so med drugimi Zakon o najetju posojila za odpravljanje posledic poplav v osrednji Sloveniji v letu 1990 (ZNPOP90, Ur. l. RS – stari 26/91), Zakon o zagotovitvi sredstev za odpravo posledic neurij, poplav in plazenja tal, ki so v obdobju september–november 1998 prizadele Republiko Slovenijo (ZZSO98, Ur. l. RS 34/99), Zakon o ukrepih za odpravo posledic določenih zemeljskih plazov večjega obsega iz let 2000 in 2001 (ZUOPZP, Ur. l. RS 21/02, 98/05).



Sl. 3. Konceptualni odnos med geološkimi procesi, geološko nevarnostjo, ogroženci, njihovo ranljivostjo in tveganjem (prirejeno in dopolnjeno po ALEXANDER, 2002).

Rezultati in razprava

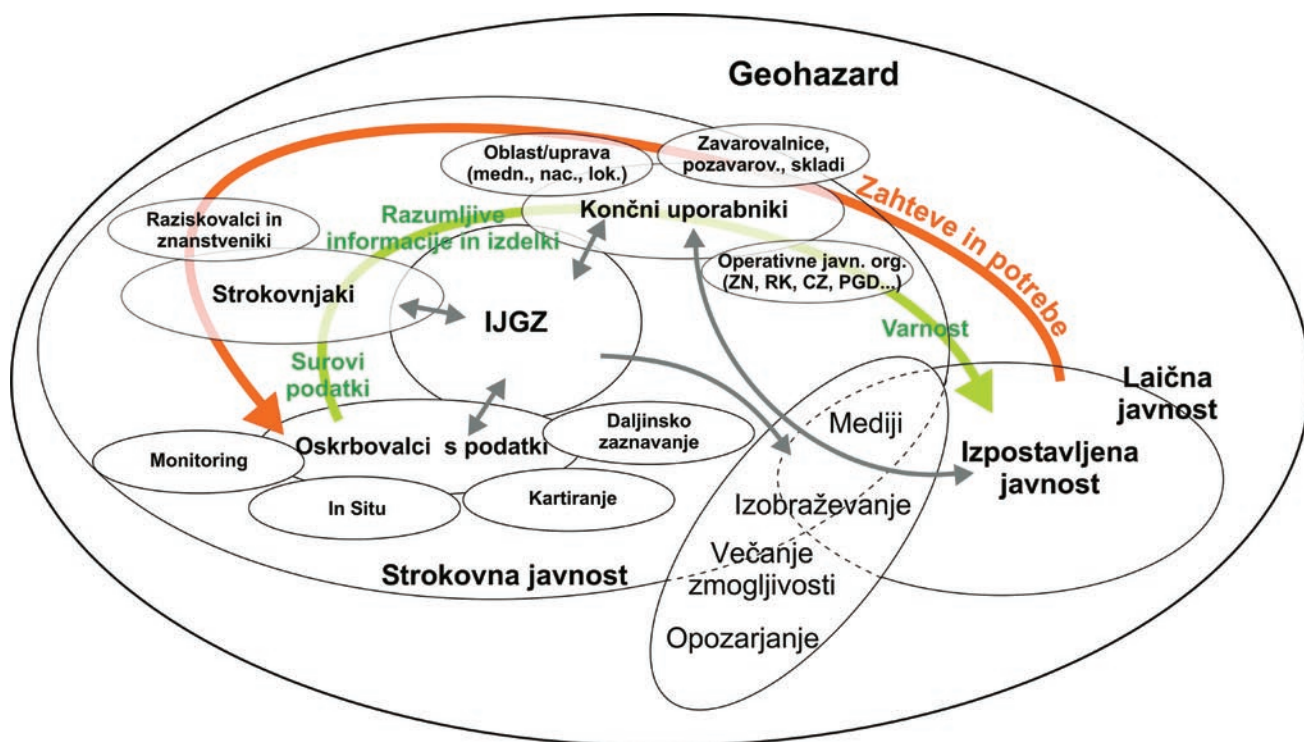
Déležniki na področju geoloških nevarnosti in proces upravljanja s tveganji ob nesrečah

Naravne nesreče kot posledica geoloških nevarnosti ne izbirajo ciljnih skupin, zato je problematika upravljanja z geološkimi nevarnostmi univerzalna in obsega številne družbene déležnike. Segmenti družbe, ki se ukvarjajo s problematiko geoloških nevarnosti, ali pa jih le-ta zadeva, so številni, njihova povezanost pa je verižno pogojena in medsebojno močno odvisna. Shematski prikaz déležnikov na področju problematike geoloških nevarnosti je prikazan na sliki 4. Družbo sestavljata laična in strokovna javnost. Laična javnost, izpostavljena nevarnostim, zahteva od upravljavca v vlogi »Končnega uporabnika (informacij o geoloških nevarnostih)«, torej države, regije ali občine, zagotavljanje varnega in kvalitetnega življenjskega prostora. Končni uporabnik zagotavlja zahtevano s pomočjo strokovne javnosti oziroma »Strokovnjakov«, katerih dognanja, mnenja in strokovne podlage temeljijo na pridobljenih podatkih o geoloških nevarnostih, ali z meritvami ali pa s pridobivanjem opisnih, znanstveno podkovanih in preverljivih podatkov o pojavih. Slednje naloge opravljajo »Oskrbovalci s podatki«, ki pridobivajo surove podatke, na podlagi katerih »Strokovnjaki« izdelajo ocene v obliki izdelkov (analiz, študij, zemljevidov ter površinskih, prostorskih in časovnih modelov ipd.), razumljivih »Končnim uporabnikom«. Z informacijami ali izdelki »Končni uporabniki« zagotavljajo najvišjo možno stopnjo varnosti v danih okoliščinah oziroma optimalno varno okolje najširšemu krogu déležnikov, torej širši javnosti. Preko medijev širša javnost vpliva na aktivnosti »Končnih uporabni-

kov« v povezavi s preprečevanjem ali z zmanjševanjem posledic geoloških nevarnosti, obenem pa je preko njih tudi obveščena s strani strokovne javnosti. IJGZ s svojimi področji delovanja pokriva večidel področja strokovne javnosti, delno pa tudi segment prenosa informacij, izobraževanja in večanja zmogljivosti (za odziv in ukrepanje) širše javnosti.

Vsi zgoraj naštetí déležniki so, v primeru, da sistem deluje pravilno, vključeni v proces upravljanja s tveganji ob nesrečah (*angl. Disaster Risk Management Cycle*), ki skozi življenjski cikel neželenega dogodka in njegovih posledic obravnava delovanje družbe ter njeno ukrepanje. Podrobnejša analiza procesa upravljanja s tveganji ob nesrečah (prikazuje ga slika 5) razkrije, da je IJGZ prisoten v vseh treh fazah procesa. V obdobju pred dogodkom oziroma nesrečo (*angl. Pre-disaster*) so pomembni koraki (1) ocene tveganja in ogroženosti, (2) izbire in izvajanja ukrepov za preprečevanje nevarnega dogodka ali za zmanjševanje njegovih posledic ter (3) izboljšanje pripravljenosti déležnikov na dogodek. Pri prvih dveh korakih IJGZ aktivno sodeluje s prostorsko-časovnimi analizami pojavljanja in amplitud geoloških nevarnosti v povezavi z obstoječimi ogroženimi elementi ter ukrepi za varno gradnjo, pri temeljenju objektov, pri preprečevanju onesnaženja podzemne vode ali tal, pri načrtih odvajanja odvečne vode, pri ukrepih za zmanjševanje posedanja in ugrezanja tal, pri določanju in analizi slednih elementov v tleh in podzemni vodi ipd., v fazi pripravljenosti pa nekoliko manj, a je še vedno prisoten s strokovnimi mnenji.

V obdobju aktivnega odziva na nesrečo (*angl. Disaster response*) je IJGZ lahko vključen v aktivnosti opozarjanja, predvsem, če opravlja monitoring ali in-situ opazovanja nevarnega geolo-



Sl. 4. Déležniki na področju geoloških nevarnosti in njihova soodvisnost

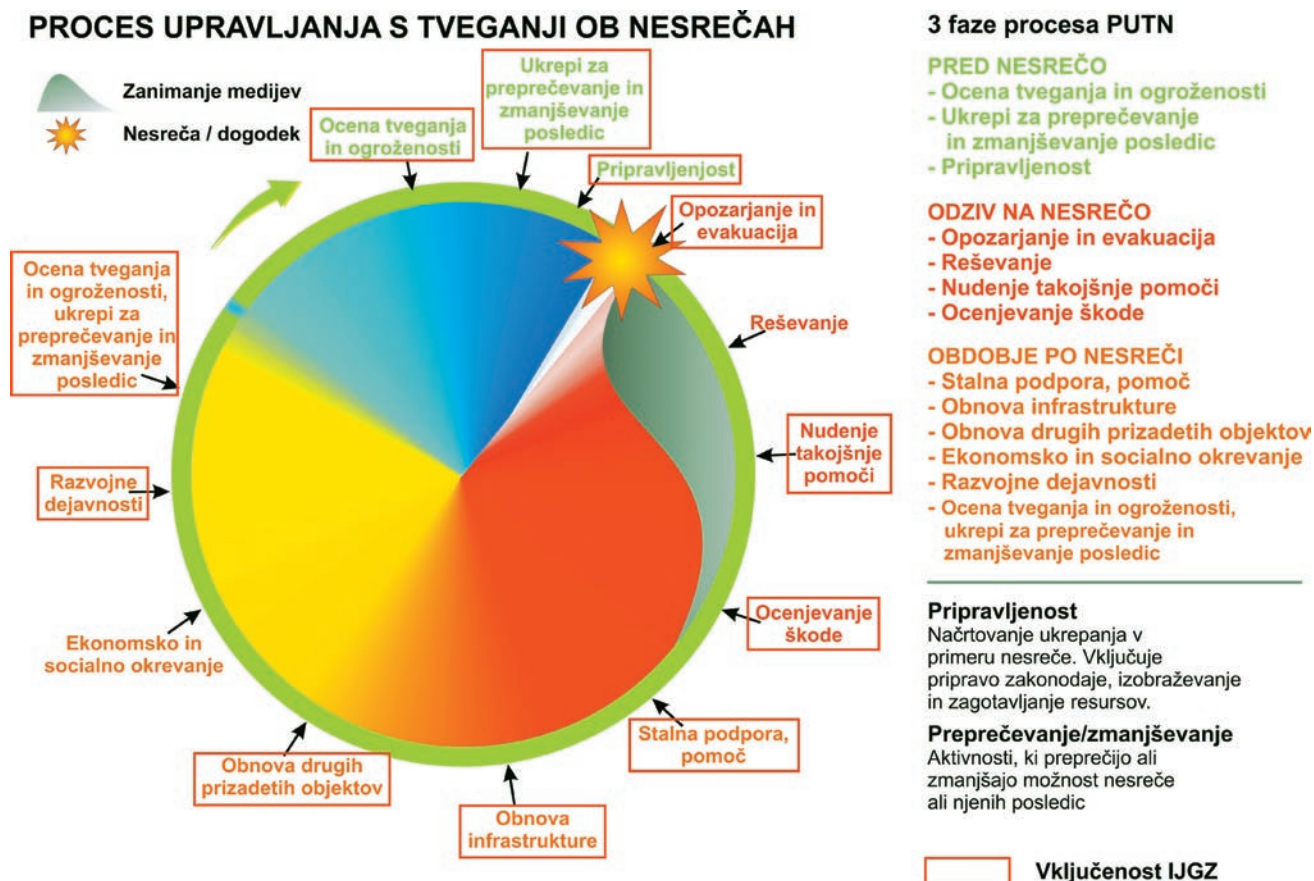
škega pojava. Ključnega pomena za zmanjševanje posledic nastale nesreče sta evakuacija in reševanje prebivalstva, ki ju takoj po nesreči opravljajo operativne javne (redkeje zasebne) organizacije, kot so Civilna zaščita, Rdeči križ, gasilska društva ipd. Poleg slednjih sodelujejo pri naslednji fazi – nudenju takojšnje pomoči – tudi vojska in prostovoljci kot fizična ter svetovalci kot strokovna pomoč, ki jih zagotavlja tudi IJGZ. Po vsaj delni umiritvi stanja pride na vrsto ocenjevanje škode, kjer so prav tako prisotni strokovnjaki s področja geologije, ki potrjujejo, da je vzrok škode geološka nevarnost oziroma ta vzrok zavrnejo. Taka pomoč je prisotna skozi vso obdobje aktivnega odziva na nesrečo, vključuje pa se tudi v proces obnove infrastrukture in drugih prizadetih objektov (bivalni, javni, nevarni, gospodarski) v fazi po nesreči (*angl. Post-disaster*). Šele, ko je proces obnove pri koncu, se začeta ekonomsko in socialno okrevanje, ki ustvarjata pogoje za razvojne dejavnosti, te pa znanstveno-strokovno osnovo za razumevanje procesov, ki povzročajo geološke nevarnosti. Šele z razumevanjem slednjih je možna ocena tveganj in izvajanje ekonomsko opravičljivih ukrepov za preprečevanje tveganj ali njihovo zmanjševanje. Krog procesa upravljanja s tveganji je tako sklenjen, a nikoli končan. Tekom opisanega procesa se venomer pojavlja moralna dilema zaradi potrebe po razumevanju nevarnih procesov na eni strani (zaradi proučevanja so pojavi zaželeni) in želje po njihovem pojavljanju v čim manjšem obsegu na drugi. Da bi strokovnjaki bolje razumeli procese, ki povzročajo nevarnosti in s tem omogočili boljše

pripravljenost nanje ter minimizacijo njihovih posledic, je »potreba« po pojavljanju proučevanih procesov s strani strokovnjakov velika, kar pa je seveda v nasprotju z družbenimi normami. Večja ko je prisotnost nekih tveganj v družbi, večja je zahteva po zmanjševanju njihovih posledic in večja je potreba po razumevanju teh tveganj, da je možno učinkovito ukrepanje. Najbolj napreden in celovit pristop k soočanju z geološkimi nevarnostmi imajo države na območju vzhodne Azije in zahodnega Pacifika.

Če povzamemo to poglavje, je lahko prispevek IJGZ pri upravljanju s tveganji ob nesrečah ter s posledicami geoloških nevarnosti precejšen. Z zbiranjem geoloških podatkov, njihovo analizo in interpretacijo IJGZ pripomore k razumevanju dinamike pojavov, to pa je osnova za razvoj scenarijev, oceno nevarnosti in tveganj. Preudarne strateške in politične odločitve se naslanjajo na dognanja strokovnjakov, ki najbolj razumejo procese okoli nas, zato je vključitev znanja o geoloških nevarnostih ključnega pomena pri oblikovanju okoljskih in prostorskih (tudi energetskih) politik.

Prednosti in slabosti IJGZ ter izzivi za prihodnje

Ustaljena praksa po Evropi in tudi po svetu je, da za geološka vprašanja posamezne države skrbi nacionalni (včasih tudi federalni) geološki zavod ali inštitut. Manj kot 10 % držav na svetu nima geoloških zavodov, vse pa pripadajo državam v razvo-



Sl. 5. Proces upravljanja s tveganji ob nesrečah (po DRMC-I - ©TORQAID, 2003) in vključenost IJGZ vanj.

ju (EGS, 2008b). Geološki zavodi imajo različno organizacijsko strukturo, a v veliki večini so javne organizacije, ki zbirajo, upravljajo in interpretirajo geološke podatke za dobrobit družbe, geološki podatki pa so javno dobro. Zaradi širokega spektra geoloških ved, se večina zavodov ukvarja z raznovrstnimi problematikami, od mikro sveta do regionalnih problematik, od laboratorijskih analiz do geofizikalnih metod daljinskega zaznavanja in od daljne geološke preteklosti do recentnih procesov. V Od triintridesetih geoloških zavodov v Evropi, ki so sodelovali v anketi (EGS, 2008b), kar trideset (90 %) aktivno udeležuje na področju upravljanja z geološkimi nevarnostmi in z njimi povezanimi tveganji, pri devetnajstih (57 %) je dejavnost v porastu, pri desetih (30 %) stagnira in le v enem primeru (3 %) je v upadu. Trije zavodi se s področjem geoloških nevarnosti ne ukvarjajo (EGS, 2008b).

Morda se zdi ta tematika na tem mestu odveč, a prav razumevanje statusa IJGZ pomaga razumeti njegovo vlogo pri upravljanju s tveganji in nevarnostmi. Problematika naravnih nevarnosti in z njimi povezanimi tveganji je nadinteresna in širšega družbenega pomena, zato je edini možen pristop k njenemu reševanju holističen in na nivoju javne službe, tako raziskovalne kot tudi strokovne.

Prednosti IJGZ so, da je tak institut zaradi svoje tradicije dela uveljavljen in neodvisen ter s tem nepristranski, saj ga ne vodijo finančni vzgibi. Geološke problematike ne poznajo umetnih meja, določenih s strani človeka, zato je povezovanje preko državnih meja nujno, s čimer se ustvarjajo mreže interdisciplinarnega sodelovanja, omogoča se nemoten prenos znanja, širi se uporaba raziskovalne opreme in optimizirajo navedene aktivnosti. Taka mreženja omogočajo tudi povečanje učinkovitosti dela in širši prenos rezultatov.

Dolgoletno delovanje na področju geologije je zahtevalo sistematično in dolgotrajno zbiranje geoloških podatkov, ki so botrovali obsežnim arhivom javnih podatkov v hrambi IJGZ. Poleg raziskovalnega dela opravlja večina geoloških zavodov tudi strokovno javno službo, kar omogoča hitro in učinkovito podporo ministrstvu in drugim državnim organom pri izvajanju ukrepov ob nesrečah in pri snovanju ustrezne zakonodaje.

Slabosti oziroma pomanjkljivosti, s katerimi se dandanes soočajo geološki zavodi na področju nudenja podpore pri upravljanju z geološkimi tveganji, nevarnostmi in z njihovim zmanjševanjem, so močno okrnjeno pridobivanje novih podatkov, predvsem tam, kjer so podrobni (ali podrobnejši) podatki že na voljo in zmotno mnenje, da je možno in-situ pridobivanje podatkov nadomestiti z metodami daljinskega zaznavanja. Slednje nudijo le podporo pri površinskem opazovanju stanja ali pojavov, ne morejo pa (še) zagotoviti pridobivanja podatkov v tretjo razsežnost – v globino, ki je pri geoloških nevarnostih zelo pomemben segment. Velika ovira je tudi otežen prenos podatkov med uporabniki ali medopravilnost (*angl. interoperability*), pomanjkanje enotnih pristopov k ocenjevanju nevarnosti in tveganj, na mednarodnem nivoju pa problemi, vezani na semantiko in onto-

logijo. Večja bi morala biti tudi vključenost širše javnosti ter končnih uporabnikov znanja (države, regij in občin) v proces upravljanja z geološkimi tveganji, nevarnostmi in z njihovim zmanjševanjem, eden glavnih razlogov za to pomanjkljivost pa je premalo ozaveščena javnost in pomanjkljivo izobraževanje déležnikov. Slednje se tudi zrcali v sprejemanju področne zakonodaje, ki je usmerjena v odpravljanje posledic, namesto v zagotavljanje pogojev za izvajanje učinkovitih preventivnih ukrepov.

Sklep

V luči dejstva, da je bivalni prostor z vsemi svojimi pritiklinami javno dobro, je najbolj smiselno upravljanje z njim skozi javne službe in javne institute. Eden temeljnih je nedvomno institut javnega geološkega zavoda. Le tako je možno kontinuirano in dolgotrajno zbiranje in primerno hranjenje zbranih geoloških podatkov ter nadalje njihovo analiziranje in interpretiranje s strani širokega kroga uporabnikov z namenom javne koristi.

Prednosti IJGZ lahko strnem v štiri postulate, (1) celovitost pokrivanja problematike geohazardov, (2) javnost podatkov in znanja, financiranih iz javnih sredstev, (3) neprofitna naravnost IJGZ in (4) dolgoročna stabilnost institucije, njenih kadrov in arhivov. Navedene postavke smiselno podpirajo pravno-formalno vključitev IJGZ v proces upravljanja s tveganji ob nesrečah.

Preventiva v Sloveniji še vedno ni zanimiva za uporabnike oziroma odločevalce. Razlog za to je povsem preprost. Javnost (torej volivci) prehitro pozabi(jo) pretekle dogodke, navkljub dejstvu da se ti v prihodnosti lahko spet zgodijo, zato odločevalci skromna sredstva, s katerimi razpolagajo, namenijo reševanju v tistem trenutku akutnejših problemov, kot je na primer sanacija. Vendar pa tak pristop zgolj odpravlja nastalo škodo, s čimer je proces varovanja (preventive) skrčen na prostorski in časovni minimum in zato ne preprečuje nadaljnjih škod ob nesrečah. Nujna je torej prekinitev tega procesa nepravilne prakse. Uspešnost takega koraka je odvisna od razpoložljivosti znanja, od višine vloženi sredstev, od obstoja pravno-formalne podlage in od njenega izvajanja, od razumevanja problematike v družbi ter od politične sposobnosti strateškega reševanja problematike naravnih nesreč. Zaradi več dejavnikov je ta proces dolgotrajen in nemalokrat boleč, a neobhoden za doseganje trajnostnega razvoja.

Literatura

- ALEXANDER, D. E. 1993: Natural disasters. UCL Press Limited, 632 pp., London.
- ALEXANDER, D. E. 2002: Principles of emergency planning and management. Oxford University Press, New York.
- BAVEC, M., BUDKOVIČ, T. & KOMAC, M. 2005: Geohazard – geološko pogojena nevarnost zaradi

- procesov pobočnega premikanja. Primer občine Bovec (*Estimation of geohazard included by mass movement processes. The Bovec municipality case study*). *Geologija* (Ljubljana) 48/2: 303–310.
- BUDKOVIČ, T. 2002: Karta geološko pogojene ogroženosti na primeru občine Bovec. *Ujma* (Ljubljana) 16: 141–145.
- BUDKOVIČ, T., ŠINIGOJ, J. & KUMELJ, Š. 2002: Karta geološko pogojene ogroženosti občin v Republiki Sloveniji – primer občine Bovec. V: HORVAT et al. (ur.): *Knjiga povzetkov, 1. slovenski geološki kongres, Črna na Koroškem, 9.–11. oktober 2002*. Ljubljana: Geološki zavod Slovenije, str. 12.
- ĐUROVIČ, B. & MIKOŠ, M. 2006: Ali smo ogroženi kadar tvegamo? Pojmi in izrazje teorije tveganj zaradi naravnih nesreč, geološko pogojenih nevarnosti (*Are we under threat when we risk? Notions and terminology of risk theory due to geological hazards*). *Geologija* (Ljubljana) 49/1: 151–161.
- EGS, 2008a: List of geology-related natural hazards (“Geohazards”). EuroGeoSurveys – Association of the Geological Surveys Organizations of Europe, Geohazards Working Group, Bruxelles.
- EGS, 2008b: Annual statistics on geological activities, Internal report. EuroGeoSurveys, Bruxelles.
- JURKOVŠEK, B. 2001: Izdelava karte geološko pogojene ogroženosti občine Bovec (1:25.000) (*Geohazard map of the municipality of Bovec (1:25.000)*). *Ujma* (Ljubljana) 14/15: 289–294.
- NatCatSERVICE, 2007: Great natural disasters. Percentage distribution. Münchener Rückversicherungs. Gesellschaft Geo RisksResearch, München. Splet: http://www.munichre.com/en/ts/geo_risks/natcatservice/default.aspx (2.8.2008)
- SURS, 2008: Ocenjena škoda po vzroku elementarne nesreče, Slovenija, letno. Statistični urad Republike Slovenije. Medmrežje: <http://www.stat.si/pxweb/Database/Okolje/Okolje.asp> (1.9.2008).
- TORQAID, 2003: Disaster risk management cycle diagram (DRMC). Torquaid, Torquay. Splet: <http://www.torquaid.com/> (3.9.2008).

Which monetary values for the quality of our environment? The example of pollution in the Krška kotlina alluvial aquifer in Slovenia

Kako denarno vrednotiti kakovost našega okolja? Primer onesnaženja aluvialnega vodonosnika Krške kotline v Sloveniji

Joerg PRESTOR¹, Pierre STROSSER², H el ene BOUSCASSE³, Jure KRIVIC¹ & Neža ER ZEN⁴

¹Geological Survey of Slovenia, Dimičeva ul. 14, SI-1000 Ljubljana, Slovenia; e-mail joerg.prestor@geo-zs.si;
jure.krivic@geo-zs.si

²ACTeon, Le Chalimont, 68370 Orbey, France; e-mail pierre.strosser@wanadoo.fr

³ACTeon, Le Chalimont, 68370 Orbey, France

⁴Hidroin eniring, Slovenčeva 95, SI-1000 Ljubljana, Slovenia

Prejeto / Received 15. 6. 2008; Sprejeto / Accepted 20. 3. 2009

Key words: contingent valuation, environmental costs, econometric analysis, groundwater status, groundwater modeling, logistic regression

Ključne besede: naključno vrednotenje, okoljski stroški, ekonomska analiza, stanje podzemne vode, modeliranje podzemne vode, logisti na regresija

Abstract

The increasing integration of economic issues into environmental policy has put the valuation of environmental goods and services at the forefront of the agenda of experts and researchers involved in the design and implementation of this policy. In the case of water, the European Union Water Framework Directive clearly indicates the need to consider environmental and resource costs in designing water pricing policies that better account for the environmental objectives of the Directive. And the assessment of environmental and resource costs is also referred to in the context of the definition of alternative environmental objectives in cases where costs of reaching the Directive's objectives are considered disproportionate or for allowing the development of new sustainable economic activities.

The paper presents the application of contingent valuation to assess the environmental costs that originate from groundwater (nitrates and pesticides) pollution in the Krško kotlina aquifer. Average willingness-to-pay values for groundwater quality improvements to stabilize groundwater quality below drinking water standards or to reduce pollution close to natural background concentrations are equal to 4,7 € and 4,8 € per household per month, respectively. The location where respondents live, their income level or their appurtenance or not to an environmental organization are independent variables that influence respondents' willingness to pay. The relatively low overall statistical significance of the regressions obtained stresses that only part of the variability of respondents' responses can be explained with the information obtained and variables considered. This is however in line with similar studies undertaken in other parts of Europe and elsewhere.

Overall, the paper demonstrates that contingent valuation is possible under Slovenian conditions. In addition to providing estimate of values of environmental costs and benefits, such contingent valuation surveys would contribute to raising people's awareness on water protection and on significant water management issues faced in Slovenia. Finally, the paper suggests continuing to test and develop different valuation methods in Slovenia for other water types (e.g. surface water) as part of the support to the implementation of the Water Framework Directive.

Izvleček

Vedno pogostejše vključevanje ekonomskih vprašanj v okoljsko politiko postavlja vrednotenje okoljskih dobrin in storitev na prednostno listo strokovnjakov in raziskovalcev, ki so vključeni v izdelavo in izvajanje okoljske politike. Vodna direktiva Evropske skupnosti kaže jasno potrebo po opredeljevanju okoljskih stroškov in virov stroškov pri oblikovanju cenovne politike vodarine z boljšim upoštevanjem okoljskih ciljev Vodne direktive. Ocenjena okoljskih stroškov in stroškov virov je tudi predmet obravnave pri opredelitvi prilagojenih okoljskih ciljev, v primerih, ko so stroški za doseg ciljev Vodne direktive lahko nesorazmerno visoki ali ko gre za omogočanje razvoja novih trajnostnih ekonomskih dejavnosti.

Članek predstavlja uporabo *naključnega* vrednotenja za oceno okoljskih stroškov, ki izvirajo iz onesnaženosti podzemne vode vodonosnika Krške kotline z nitrati in pesticidi. Povprečna zneska, ki so ju gospodinjstva pripravljena mesečno plačevati za izboljšanje kakovosti podzemne vode, to je za ustalitev kakovosti podzemne vode pod

mejnimi vrednostmi standardov za pitno vodo 4,72 € in za zmanjšanje onesnaženosti na naravno ozadje 4,80 €. Neodvisne spremenljivke, ki vplivajo na višino zneska, ki ga je anketiranec pripravljen plačati, so kraj bivanja, dohodek in pripadnost okoljskim organizacijam. Razmeroma nizka skupna statistična značilnost izračunanih regresij kaže, da lahko s pridobljenimi informacijami in upoštevanimi spremenljivkami pojasnimo le del raznolikosti odgovorov anketirancev. To pa se ujema tudi z rezultati podobnih študij v drugih delih Evrope in drugod.

Članek kaže, da je *naključno* vrednotenje v Slovenskem okolju mogoče. Poleg pridobivanja ocen višine okoljskih stroškov in dobrobiti bi take raziskave *naključnega* vrednotenja dvignile zavest prebivalstva za zaščito vode in za pomembna vprašanja upravljanja z vodami v Sloveniji. Članek tudi predlaga nadaljevanje takega načina vrednotenja okoljskih stroškov in dobrobiti in predlaga nadaljnji razvoj različnih metod vrednotenja v Sloveniji, tudi za druge vode (na primer površinske), kot del podpore pri vpeljevanju Vodne direktive.

Introduction

Comprehension of sustainable groundwater resources management in the past was strongly characterized by the uncertainties that turned it to hardly understandable category to decision makers and land users. Any human activity that represents the pressure on the environment causes certain impact. So, how to maintain the lasting status without any threat or risk for the resource? Hardly understandable sustainable principle in the past led to black and white (green) acting and maintenance of end of pipe treatment principle.

In Slovenia the average pressure from human activity is rather small owing to high portion of forest and other natural land (62,4%) and on the other side low portion of urbanized (2,6%) and agricultural areas (35%). The average population density is 96 inh./km². Rather low step of pressures and rich groundwater resources are reasons for relatively rare water treatment facilities, limited almost to microbiological treatment and reduction of turbidity in karst water supply systems and iron/manganese reduction from intergranular aquifer water supply systems. Also the artificial recharge protection is effectuated only on two alluvial aquifer water resources in the north eastern part, on the highly agriculture and urbanized alluvial aquifer areas.

The most severe impact from the past policies on the chemical status of groundwater is evidently excessive manure usage and pesticides application. The second problem from the past policies was reaching effectiveness of protection measures and also spatial planning on vulnerable groundwater resources areas. Both these problems are still remaining, as it appears in high portion, resulting from lack of awareness of the existing pressures/impacts and use/non-use value of water.

BRUNDTLAND report's (1987) sustainability definition, Water Framework Directive (60/EC/2000) and actual progress in sustainability comprehension as entity of individual basin groundwater balance (and as a suitable combination of entropy changes and energy ("physical sustainability")) (HERMANOWICZ, 2005) are in the way to produce crucial changes from the past water resources management policy.

The actual legislation in Slovenia, adopted in last years in the frame of the WFD implementation process, significantly move the water resources management from local authority ground to water resource as a natural entity area. Fur-

thermore the actual legislation controls load to the water environment, provides monitoring of emissions and impacts, water quality standards, critical values for starting the protection measures and trend reversal, criteria for water protection areas definition, detailed risk analysis, development of water supply systems and development of river basin management plans.

To reach effective implementation of the adopted legislation and new policies, the full transfer of the above mentioned directives and actual sustainability comprehension to local level, to individual local groundwater bodies' users is still needed. Each individual hydrogeological basin water balance has to be emphasized by pressures and impacts balance in order to get reliable information of present status, use and non-use value of water and economic assessment of protection and remediation measures. Reliable information of status to the local level is crucial to significant rise of awareness and water resources economic evaluation.

The protection of the environment in general, and of water resources (including groundwater) in particular, has become in recent years increasingly questioned by economic operators directly impacted by environmental policies. Partly as a response to this questioning, the design and implementation of environmental policies are increasingly integrating economic concerns via a more systematic use of economic assessments to investigate the tradeoffs between economic development and the protection of the environment. In parallel, policy makers have shown interest in applying economic instruments (taxes, charges... such as the groundwater abstraction tax in Slovenia) in the field of environment. Such economic instruments are means to provide incentives to economic operators for more sustainable use of natural resources – but also for collating financial resources for supporting investments in environmental protection infrastructure (e.g. wastewater treatment plants). In the field of water, the recent European Union (EU) Water Framework Directive (WFD) has taken clear stock of this evolution as it integrates directly economic principles, methods and tools and instruments into water policy.

For experts involved in the management of water resources and implementation of the EU WFD, but also for policy makers, the increasing integration of economics into water policies has led to new challenges – be it in terms of processes and actors involved or in terms of methods and tools to be applied. With regards to the latter, how

to integrate environmental benefits or environmental degradation into economic analyses has received increasing attention. Indeed, it poses the question of the value of environmental goods and the possibility to estimate a monetary value for these goods (e.g. improvements in water quality) for which there is often no market and price.

Objectives and content of the paper

The paper presents an attempt to value environmental goods (i.e. a given level of environmental quality) in monetary terms under Slovenian conditions. It summarizes one of the first experiences in the (monetary) valuation of environmental goods in this country and of the application of a specific valuation method, i.e. contingent valuation, for assessing environmental costs linked to groundwater pollution. This activity has been developed as part of a collaborative effort between the Geological Survey of the Republic of Slovenia and the Krka Pilot project – a project launched in 2004 by the Ministry of Environment and Spatial Planning of Slovenia to support *inter alia* the implementation of EU WFD in Slovenia¹ It has also benefited from links and input from the EU-funded BRIDGE research project that aims at proposing a sound methodology for the establishment of threshold values for pollutants in groundwater for the forthcoming EU groundwater directive.

The paper summarizes first how environmental and resource costs are considered in the EU WFD – and for which policy decisions these costs might need to be assessed. It then provides an overview of existing methods for valuing environmental costs and benefits. This overview includes a summary of the existing valuation studies available in Europe in the field of environment in general and more particularly in the field of water and groundwater resources. The paper continues by presenting the application of the contingent valuation method in the Krško kotlina aquifer (East of Slovenia). The characteristics of the aquifer and relevant methodological aspects are described, before presenting the results obtained through statistical analyses of survey data. The paper ends with some conclusions on the potential use of contingent valuation in Slovenia in particular in the context of the implementation of the WFD.

Environmental and resource costs in the WFD

As indicated above, the EU WFD is the first piece of European legislation which promotes the integration of economic principles, methods, tools and instruments into environmental policy. In particular, the WFD requires Member States to account for environmental and resource costs (or benefits) in their water management decisions, in particular (i) to design water pricing policies that support the achievement of the environmental objectives of the directive and (ii) to justify lower environmental objectives based on the compari-

son of all (including environmental) costs and benefits.

Direct references in the WFD to environmental and resource costs include Item (38) of its preamble of that specifies that ... *The principle of recovery of the costs of water services, including environmental and resource costs associated with damage or negative impact on the aquatic environment should be taken into account in accordance with, in particular, the polluter-pays principle...* Article 9 of the WFD dealing with the recovery of the costs for water services reinforces from a legal point of view this reference as it specifies that *Member States shall account of the principle of recovery of the costs of water services, including environmental and resource costs...*

Indirect references to environmental and resource costs (or benefits) can also be found in the WFD, e.g. in its Article 4.4. (b) that refers to significantly better environmental options (implying lower environmental costs) or Article 4.7.(c) that requires Member States to compare the potential benefits of any new (morphological) modifications or economic activity with the costs to the environment that would result from this modification or activity.

The WFD, however, does not specify how environmental and resource costs should be evaluated and valued in monetary terms. Preliminary discussions among EU Member States provided some insights in existing valuation methods. They stressed however the need for additional work to better define environmental and resource costs and to make these methods operational for supporting policy decisions and the development of river basin management plans (EUROPEAN COMMISSION, 2002). Further work at EU level was then performed which main outcome is summarized in the following section.

Valuing environmental costs – state of the art

Environmental costs can be defined as the costs of damage that water uses impose on the environment and ecosystems and on those who use this environment. Resource costs are the costs of foregone opportunities which other users suffer due to the depletion of water resources beyond their natural rate of recharge or recovery (e.g. in case of over-abstraction of groundwater) (EUROPEAN COMMISSION, 2002). Environmental and resource costs are clearly inter-related and they can not just be added one to the other. Moreover, resource costs might exist in the absence of environmental costs, e.g. if the allocation of water between users is not efficient but no pollution or depletion of the resource takes place.

Both environmental and resource costs are external costs. An external cost occurs if the activity of one agent causes a loss of welfare to another agent and if this loss of welfare is uncompensated. If the loss of welfare is compensated then it is an internal cost. For example, discharges of wastewater into a river, even if partially trea-

ted, might have negative impact on downstream water uses if for example pollution resulting from this discharges requires additional treatment for downstream uses. If financial transfers between the polluter and the affected uses take place or if pollution charges/taxes are imposed on the polluter, then the external (environmental) cost is said to be internalized. Otherwise, it is an external cost.

Resource costs are due to an economically inefficient allocation of water in terms of quantity or quality. Resource costs are equal to the net benefits for present and future uses minus the net benefits of the best alternative use (now or in the future). Estimating resource costs requires calculating environmental costs, if they are relevant and significant. In this paper, however, we focus solely on environmental costs.

Different methods are proposed for assessing environmental costs. Cost-based methods aim at obtaining a proxy of the true value of environmental costs by estimating the costs of measures & projects that would be required to prevent or mitigate current damages to the environment (for example by building additional treatment to clean polluted surface water). Benefit-based methods focus on users of the environment – and on the potential benefits these might obtained if the environment would be cleaned. A variety of methods are part of this group such as:

- The *avoided-cost* method – by estimating the costs that would be avoided by economic sectors using water if this water would be cleaned up to given standards. For example, the denitrification costs drinking water company are currently paying to treat groundwater polluted by nitrates;
- The *transport-cost* method – estimating the value of an environmental good such as a natural site by estimating the (transport, accommodation, etc) costs incurred by visitors for visiting this natural site;
- The *hedonic pricing* method – where real estate prices are correlated to different characteristics of real estates including in terms of the quality of the natural environment in which they stand. Differences in real estate prices correlated to different qualities of the natural environment helps estimating the values for these environmental qualities;
- The *contingent valuation* method – based on the construction of a hypothetical market for a given environmental good (e.g. water at a given quality) with respondents being asked through structured questionnaires to explicit their *willingness-to-pay* for this environmental good.

Under some conditions, values obtained in given locations can be used for estimating en-

vironmental costs and benefits in another location. This method also named *benefit-transfer* is only possible if the environmental goods and the general behavior of the population at both site(s) (the site where values have been developed and the site where values are to be applied) are similar.

Various examples can be extracted from literature.

- **Avoided costs and contingent valuation**

A benefit-based valuation was conducted in France in the Alsace region. Potash ore extraction leads to high concentration of chlorides. When public authorities became aware of the extent of the problem, measures were implemented. Measures aim at preventing any further degradation of the aquifer. In 2027, approximately 96 percent of the salt present in the aquifer in 2002 is supposed to be removed. But according to the Water-FrameWork requirements, “good status” has to be achieved by 2015. So an analysis was conducted to assess the benefits of an accelerated clean-up scenario.

For example, some water utilities have to treat water, because of the salt, in order to make it drinkable. So the benefits of an accelerated clean-up are equal to the avoided costs for drinking water firms between 2015 and 2027. It is estimated at 4.6 Millions euros. Another benefit is related with non-use value. A contingent valuation implemented in the region stated that the WTP to preserve the aquifer is equal to 61 euros per household. Taking into account the population close to the polluted area and taking into account the discount rate, we can estimate that the total non-use benefits are ranged between 17.6 and 35.2 million euros.

- **Transport costs**

A transport costs study was conducted to value the recreational amenities of the French storage dam “Lac de Der”²². Phone made possible 2021 interviews of users and non-users living in the municipalities near the lake, including 1477 that are part of the sample. For them two substitute sites were identified, the Orient lake and the Madine lake. 241 persons were interviewed directly on the site in November 2002. Among them 111 were included in the final sample.

The journey costs are ascribed to the distance between home and the lake, taking into account the power of the vehicle and cost per kilometer. It is divided by the number of visitors. Transport costs are also composed of opportunity costs, a function of the time needed for the journey and income.

First step is to explain number of visits thanks to transport costs, but also socio-economic cha-

	Water utilities	Households	Agriculture		Industry	Non-use value
			Corrosion	Crops		
Avoided costs	4,6	[1,2; 2,3]	0,3		NA	
Increase of production				0,6		
Contingent valuation						[17,6; 35,2]

Table 1. Summary of results for avoided costs and contingent valuation

Table 2. Summary of results for a transport costs study

Value (in euros)	Without taking into account substitute sites		Taking into account substitute sites	
	Per visit/per person	Per year/per person	Per visit/per person	Per year/per person
	38	[262 / 264]	[19 / 22]	[150 / 155]

characteristics as well as practiced activity and knowledge about the site. Then this information is used to estimate consumers' surplus with the coefficients before transport costs.

- Hedonic pricing method³

House premium due to the vicinity of a lake is about 6% is one of the conclusions of a Dutch hedonic pricing study. The period 1989–1992 was chosen to study nearly 3000 house transactions in 8 towns and estimate the effects of environmental attributes on transaction prices.

A first step was to regress house prices on structural housing attributes. The difference between this value and the actual price is considered as

resulting of differences in locality (public and environmental facilities). A location-indicator⁴ is derived from this difference and regress on location variables.

The largest increase, up to 28 %, in house prices due to environmental factors is for houses with a garden facing water, which is connected to a sizeable lake. This figure is obtained by summing the 7 % augmentation due to the vicinity of the lake, 10 % due to a view of the lake and 11 % due to a facing garden.

Methods differ by type of information mobilized, cost of application, level of expertise. They all have advantages and disadvantages since they are designed to specific, but various, goals. Main characteristics are summarized on table 4.

	Feature	Significant	Not significant	Not tested	Premium
<i>In the residential area</i>					
Green stripe	View of	3 cases, n=962	3 cases, n=1442	2 cases, n=409	4%, 5%, 5%
Park	View of	2 cases, n=456	6 cases, n=2537		7%, 8%
	Vicinity	1 case, n=112	1 case, n=2701		6%
Canal	Facing garden		1 case, n=297	7 cases, n=2516	
	View of	2 cases, n=391		6 cases, n=2422	4%, 5%
Lake	Facing garden	2 cases, n=443		6 cases, n=2370	11%, 12%
	View of	2 cases, n=443		6 cases, n=2370	8%, 10%
	Vicinity	2 cases, n=443		6 cases, n=2370	5%, 7%
<i>Bordering of residential area</i>					
Park	Vicinity	1 case, n=297	3 cases, n=1031	4 cases, n=1485	12%
Lake	Vicinity	3 cases, n=1166		5 cases, n=1647	5%, 7%, 10%
Open space	View of	2 cases, n=929		6 cases, n=1884	6%, 12%
<i>Regional feature</i>					
Wood	Presence	2 cases, n=890		6 cases, n=1923	8%, 12%
Lake	Presence	1 case, n=336		7 cases, n=2477	6%
Diversity of landscape types	Presence	1 case, n=593		7 cases, n=2220	9%

Table 3. Summary of results for a hedonic prices study

Table 4. Summary of characteristics for the different valuation methods

	Information mobilized	Cost of application	Level of expertise	Advantages	Disadvantages
Avoided costs	“Technical” information	+	Engineering		- Do not elicit non-usage value - Need to make prospective
Contingent valuation	Sample of potential respondents (if mail questionnaire)	+++	- Sociologic (questionnaire) - Statistics - Economics (distinction between use and non-use values)	Elicit usage and non-usage values.	- Bias of questionnaires - Based on respondents answers = > subjective - Difficulties to make people understand the good they need to value
Hedonic prices	Data on house transaction	++	- Statistics - Real estate	Well adapted to assess the effect on welfare of a change in environment quality.	- Do not elicit non-usage value. - Difficulties in the selection of suitable data (comparable houses). - Take care of inflation effects
Transport costs	- Sample of potential respondents (if mail questionnaire) - Data on visit frequencies, transport costs	+++	- Statistic - Economics	Well adapted to assess recreation values.	- There might be substitute sites. - The visit might have multiple goals. - Do not elicit non-usage value.

Avoided costs require very specific information collected to experts. It can be more or less expensive, depending on the difficulty to collect it, whether it is free or not ... To implement the other methods, such knowledge is not needed, except for the definition of scenarios in contingent valuation.

Contingent valuation and transport costs methods also have an important cost price because of the time needed to construct questionnaires, send them or pay interviewers – in case of face to face interviews, and do the statistical analysis. Hedonic prices raise information about house transaction, which you may have to pay. And, as for contingent valuation and transport costs, statistical analysis is time consuming.

As a conclusion, contingent valuation seems to be one of the more expensive methods. Nevertheless, it is largely the more commonly used. Indeed, one of his main advantage is to elicit both use and non-use values. In the particular case of groundwater quality, hedonic prices and transport costs can not be used. Avoided costs could also be implemented, but as illustrated by the study on chlorides, these methods are not exclusive.

The strengths and weaknesses of each method are widely recognized. The type of environmental good to be valued (e.g. visible or not) and its current uses (e.g. by economic actors or for recreation), the location of the good (e.g. hedonic pricing best works in densely populated areas), the need to assess use and/or non-use values (see Box 1) or the policy context in which results will be used (e.g. for defining adequate levels for environmental taxes or for setting economically-efficient environmental objectives) are elements that need to be considered when choosing valuation methods. Also, methods can be used in combination in particular when more detailed assessments are required. In general, cost-based methods are more suited to cost-recovery and pricing discussions – while benefit-based methods

Box 1. Use and non-use values – what are they? Economic theory distinguishes between different *use values* and *non-use values* that form together the overall value of an environmental good. Use values are values related to the direct use of water for drinking, the operation of economic actors, recreation, etc, as currently taking place. They include also potential values attached to water (*option value*) because of possible alternative uses as compared to today's situation. For some existing uses, a market might exist (e.g. market for drinking water) that can help assessing use values. For others (e.g. water as part of landscape or for recreation), there might be no market and the value of the environmental good will then need to be assessed indirectly, e.g. via hedonic pricing or transport cost methods. Non-use values are linked to possible values water might have for future generations (*bequest value*) or the intrinsic value water has because it exists (*existence value*). Non-use values can only be captured with contingent valuation

can best feed into debates on the definition of environmental objectives and possible derogation or exemptions to these objectives.

Because of the importance of future policy needs in Slovenia with the definition of threshold values for pollutants in groundwater (as part of the implementation of the forthcoming EU groundwater directive), it was decided to test contingent valuation methods in an aquifer considered as *at risk* of not reaching good groundwater status by 2015. The Krško kotlina aquifer located at the downstream part of the Krka river sub-basin (East of Slovenia) was selected for this pilot test.

Main characteristics of the Krška kotlina aquifer

The Krško kotlina aquifer occupies a part of Krško-Brežice plain between the towns of Krško, Brežice, Brod and Velika vas. The area covers about 90 km². The average altitude of the plain is around 155 m and it ranges between 140 and 160 m.

Geology

The Krško-Brežice basin is a tectonically formed depression. In the area of Krško plain it has been filled with alluvial sediments of the Sava river that are composed of Quaternary gravel and sand, and Pliocene sand and clay. Beneath the Pliocene strata are Miocene rocks, mostly marl. The average thickness of Quaternary sediments is about 20 m. The thickness of Pliocene sediments ranges from 0 to 600 m whereas the thickness of Miocene strata ranges from 50 to 700 m.

Hydrogeology and hydrology

The Krško kotlina aquifer is being drained in two major directions. The part of the aquifer situated north of the Sava river is conveying underground water in southerly direction, whereas the major part of the aquifer between Sava and Krka rivers is being drained in easterly direction.

Alluvial Sava river sediments, composed of Quaternary gravel and sand, are highly permeable with their hydraulic conductivity coefficient (K) ranging from 10⁻⁵ to 10⁻³ m/s. The average K value is 2*10⁻³ m/s. These sediments form a regional unconfined aquifer with intergranular porosity.

The Pliocene sediments have an average hydraulic conductivity in the range of 10⁻⁸ m/s. They act as an impervious barrier at the bottom of the aquifer. Miocene marl strata have even lower permeability, with the hydraulic conductivity as low as 10⁻⁹ m/s.

The aquifer is recharged by infiltration and underground flow from the hills around the Krško kotlina. In the Krško town area and upstream from the Krško nuclear power plant dam the Sava river recharges the aquifer, whereas in other areas it drains the aquifer. The aquifer is also drained by the Krka river. The effect of the Sava river

stage undulation on groundwater level can be observed up to 400 m from the river. The average discharges of the Sava and Krka rivers are 290 and 55 m³/s, respectively.

The main groundwater abstractors are the Brege and Drnovo pumping stations. The average pumping rate is 90 l/s per pumping station, therefore they have a considerable influence on groundwater level.

Precipitation and infiltration

The precipitation in the Krško kotlina and its surroundings is monitored in several hydro-meteorological stations. The average precipitation in the area is estimated between 900 and 1100 mm/y and temperature 11°C in the period from 1961 to 1990 (KLIMATOLOGIJA SLOVENIJE, 1995). The average long-term evapotranspiration in the area is estimated at 500 mm/y (PRESTOR & JANŽA, 2006). Infiltration is thus estimated at approximately 500 mm/y.

Pressures & impacts, main abstractors

The main pressures to groundwater are nitrates and pesticides. Agricultural land represents more than 80 % of the area.

	Krška kotlina	Slovenia
Agricultural land (%)	73,8	35
Urbanized areas (%)	8,6	2,6
Forest (%)	12,8	58,2
Agricultural land + Urbanized areas (%)	82,4	37,6
Forest + other natural land (%)	17,6	62,4
Population (inhabitants)	6.363	1.952.528
Population density (inhab./km ²)	65,7	96,3

Population density is relatively small, but lacking of waste water treatment, important part of polluted water is drained directly to the groundwater.

	Krška kotlina	Slovenia
Public road density (m/km ²)	683	320
Railway density (m/km ²)	122	64
Industrial waste deposits	1	27
Public waste deposits	2	58
Waste water emissions	11	579
IPPC facilities	5	170

The important pressure is also traffic, as the main traffic stream between Ljubljana and Zagreb (Slovenia and Croatia).

The alluvial aquifer with no significant cover layers is highly to extremely high vulnerable. This means that we presume that practically all pollution on the ground penetrate through the unsaturated zone to groundwater. Expected concentration of nitrates in groundwater body is relatively high (30,8 mg/l), but still below the critical value (75% of quality standard).

	Krška kotlina
N (kg/ha) average surplus	83,6
N from agricultural land (kg/ha) average surplus	78,9
Total N from urbanization (kg/ha) average surplus	3,4
Total N from other sources (kg/ha) average surplus	0,7
Expected concentration of NO ₃ (mg/l) average value	30,8

State monitoring network showed aggregated average value 32,4 mg/l of nitrates (2003 + 2004). Upward trend was present in six years period (1999–2004).

Atrazine and desetil-atrasine are present, the first always bellow quality standard (0,024 µg/l) and with downward trend and the second (0,07 µg/l) still with upward trend. Other pesticides are sporadically and temporarily exceeding quality standards.

Tetrachloreten was exceeding quality standards in two monitoring sites (expected origin from limited areas). Ammonium and phosphates were also temporarily exceeding quality standards at several monitoring points showing the expected impact of characteristic dispersed population pollution origin.

The pressures and observed impacts on groundwater chemical status show the need to economic consideration of critical value, i.e. starting point and the last time of measures entering into operation for trend reversal, especially concerning additional protection measures.

Also very thorough economic assessment is needed for eventual spatial redistribution of additional measures that would improve the quality of groundwater which is used for water supply as close as possible to natural background.

Developing the contingent valuation survey

The implementation of the contingent valuation survey followed a series of steps common to all socio-economic surveys (development of draft questionnaire, pre-testing⁵, refinement of the questionnaire, design of sampling plan, interviews, data entry and checking).

The structured questionnaire developed dealt with issues such as: introductory presentation of the context (characteristics of the aquifer, main sources of pollution, existing problems), respondent's general views on the environment, current use of groundwater and relationship to natural waters, importance of actions for restoring groundwater quality and willingness to pay for such actions, respondent's socio-economic profile and general (open) reactions and comments on the questionnaire and its content. With regards to actions for restoring groundwater, two different restoration programs were proposed to respondents in a sequential order: asking first whether respondents would be willing to support financially a program aimed at restoring drinking water quality for the aquifer and how much; and then, if their response to the first program was positive, asking them whether they would be will-

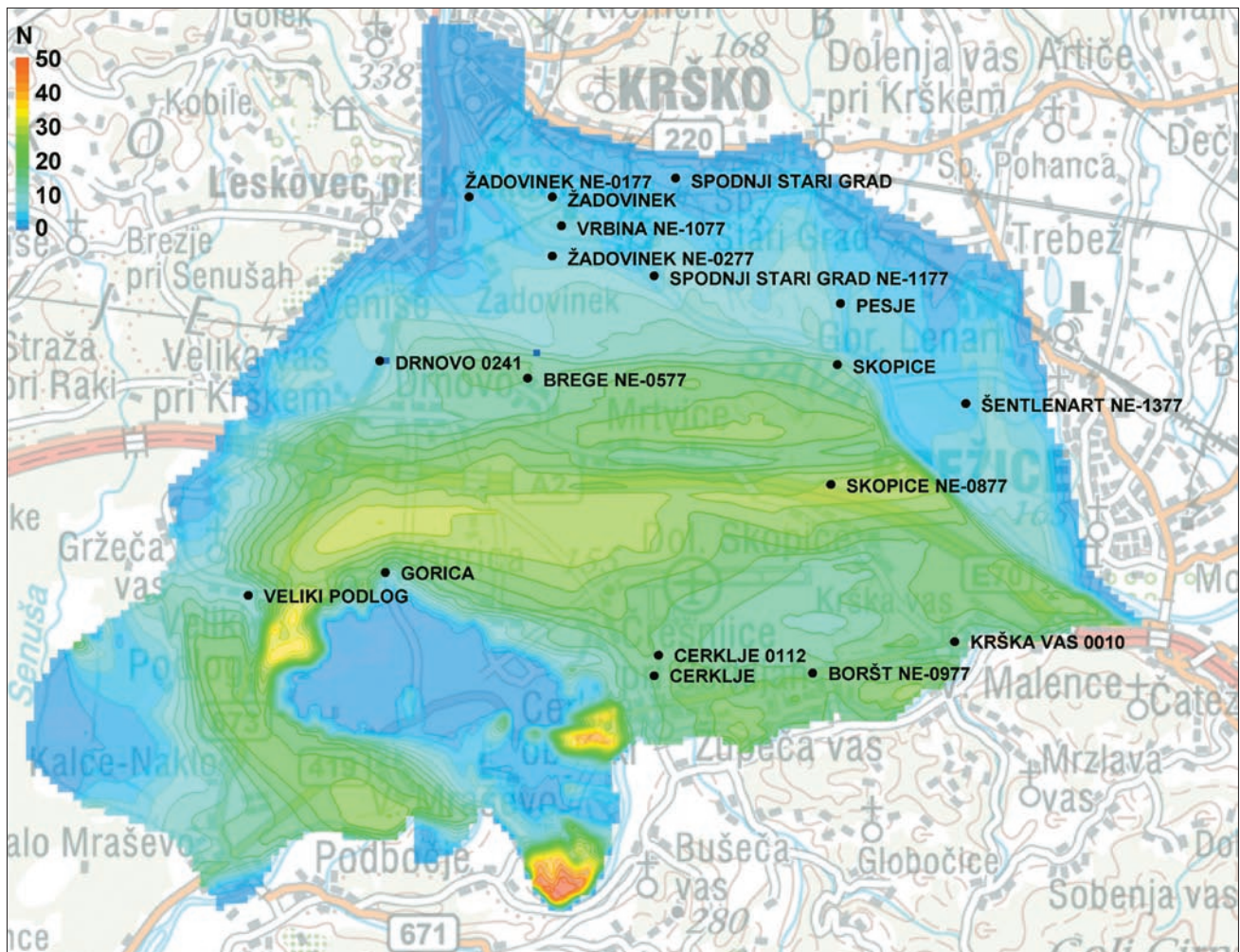


Figure 1. Numerical model of NO₃ (mg/l) content distribution in groundwater of Krško polje alluvial aquifer

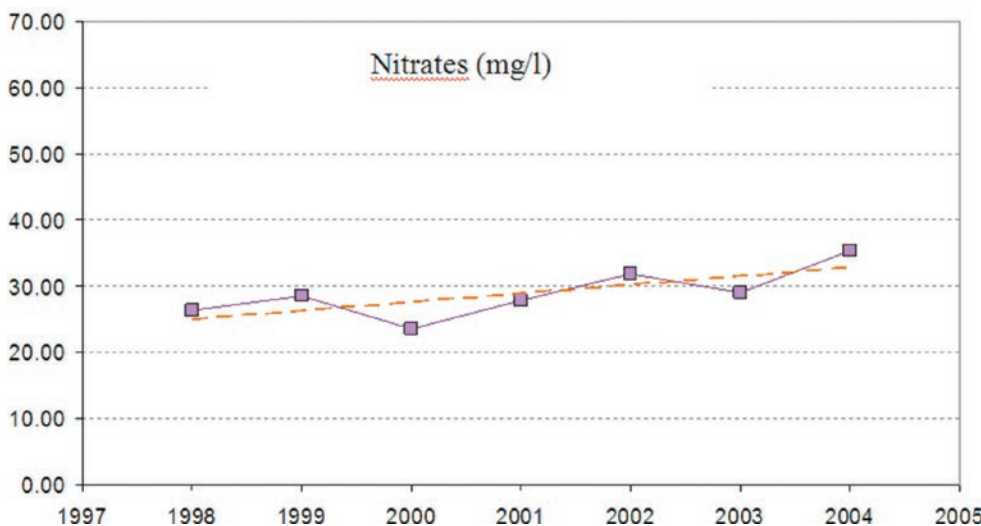


Figure 2. Upward trend of nitrates content 1999–2004 in groundwater of Krška kotlina alluvial aquifer

ing to pay additionally for restoring groundwater quality to near-background (natural) concentration and how much. The information describing these programs and presented to respondents is summarized in Table 1.

Two different levels of information were provided to two sub-samples of respondents to test the likely impact of information on respondent's willingness to pay (both yes/no and amount). A simplified set of information as compared to what

is described in Table was provided to around half of the respondents. It did not make reference to pesticides (it was assumed that people's knowledge of the presence of pesticides would influence their answer) and did not specify potential measures and economic sectors targeted by measures that would need to be implemented for reaching different groundwater quality levels.

Face-to-face interviews were performed in April/May 2006 for 429 respondents representa-

Table 5. Main characteristics of the two groundwater restoration programmes proposed to respondents

Main characteristics of programme(s)	Programme 1	Programme 2
Expected impact on groundwater	An action programme with protection measures targeting different sectors at the origin of pollution (agriculture, households, industry...) proposed for stabilising nitrate and pesticide concentration in groundwater	In addition to the measures proposed in Programme 1, stricter restrictions on land planning, bans of polluting products, compulsory treatment of wastewater ... imposed to further reduce pollution to the aquifer
Potential measures and sectors targeted	<ul style="list-style-type: none"> • Implementation of good agricultural practices for the agriculture sector • Controlled used of pesticides and strict application of good practices in all sectors (agriculture, transport, gardening, etc) • Installation of new sewage and modernisation of existing ones for reducing leakages • Building of manure storage for the larger farms for better manure management • Improved management of septic tanks for isolated houses and installation of modern septic tanks for all new constructions/houses 	<ul style="list-style-type: none"> • Strict land planning with ban of new activities that might potentially pollute the aquifer • Shift to more ecological farming for agriculture for selected sensitive areas; • Ban of pesticide use for gardens, transport infrastructure and municipal use; • Obligation for replacement & proper management of septic tanks for all isolated houses • Shift to less polluting inputs and products for industries and households.... • Active awareness raising campaign for the entire population
Overall impact	This will ensure in the longer term a drinking water quality for the entire aquifer - additional costly treatment for drinking water will not be required. However, some risk might remain for connected nature protected areas and ecosystems.	Such an ambitious action programme would ensure drinking water for the entire aquifer and groundwater quality close to natural conditions. It would ensure no risk to connected nature protected areas as required for healthy development of natural ecosystems, birds, fishes...

tive of population of the Krško kotlina aquifer in terms of sex and age. Around half of the interviews took place in the street, the other half taking place at the respondents' home. Respondents from different municipalities were selected to represent different conditions in terms of distance to the aquifer. Respondents living above the aquifer, nearby the aquifer and between 5 to 40 kilometres from the aquifer were interviewed to test the assumption that their willingness to pay for restoring the quality of the Krško kotlina aquifer would decrease as one moves away from the aquifer. All data collected through interviews were then entered into a spreadsheet and analysed statistically.

First results

Table 6 summarizes the survey results on willingness-to-pay. 63 % of respondents accepted to pay for the first scenario and among them 67 % accepted to pay for the second one, which means 42,21 % of respondents accepted to pay for both

scenarios. Respondents averaged 5,6 € per month for the first scenario with a range of 0,04 to 4,2 € per month. 50 % of them declared an amount below 4,2 €. For the second scenario, willingness to pay amount is between 0,21 and 21 €, with an average of 9,2 €. This must be added up to the first amount to obtain the total willingness amount which comes to 7,3 € for half of respondents who agreed to pay for both scenarios.

Among respondents refusing to pay 37 % refused, because it is not acceptable for them to pay as principle or because it is not their rule to pay for it: "taxes are already high enough", "polluters or the state should pay", ... Such respondents are not "true" zero bidders. They refuse to pay as a sign of protest, even if they accord a positive value to the aquifer, conducting to censored data.

Three quarters of respondents declared they had already heard about the situation of groundwater and most of them think it corresponds to reality. 83% think the first program is feasible but only just the half is confident with the results of the second scenario.

Table 6. Survey results on willingness-to-pay

	% saying yes.	Mean (std dev)	Median	
			Min	Max
Would you accept to contribute financially for the 1 st scenario?	63			
WTP amount for the 1 st scenario		1345 (1101)	1000	5000
Would you accept to contribute financially for the 2 nd scenario?	67 (42.21% of all)			
WTP amount for the 2 nd scenario		1147 (1000)	1000	5000
WTP amount for both scenarios		2194 (1888)	1750	9000

Regressions

Since many respondents refused to pay, data include zero and positive values. Ordinary least squares (ols) method applied to such data would lead to a bias in the results (Greene, 2000). Ols must then be applied to the positive value only and the will to pay can be explained thanks to a logistic regression. If both zero and positive values, the bid function can also be modeled using maximum likelihood and since the responses are censored at zero (negative WTP amounts are not permitted), Tobit analysis is appropriate. Indeed it involves truncation of the dependant variable below zero. Protest answers, coming from re-

spondents refusing to reveal their actual willingness-to-pay, can either be excluded or integrated in the Tobit regression. Both solutions are presented in table 8.

Second scenario is only proposed to respondents who accepted to pay for stabilizing pollution in the groundwater. Since they accepted to pay for first scenario, it is not possible to distinguish protest answers and zero bidders. So, only logistic and ordinary least squares- on total willingness-to-pay amount⁶- are applied.

Explanatory variables include dummy and continuous variables, described on table x. A variety of other potential explanatory variables

were investigating with the best fitting models of WTP responses being reported in table 7. Explanatory variables must be strongly correlated with the dependant variable but not between them. A choice had to be made between variables such as education and income, age and time spent in the region. The one which best explain the dependant variable and the closest to the phenomenon which is measured were chosen. Among the variable remaining, tests of independency were undertaken. For example being active in an environmental organization, citing environment as main problem in the region and accepting to pay for a patrimony reason could be related. Nevertheless,

Table 7. Descriptive statistics: variables used in the contingent valuation models

Variable	Definition	Mean or percentage
Age	Age of the respondent	Average = 48.2 years
Low income	Has a low income: less than 835 � per month (1) or not (0)	36.60 % has an income below 835 �
Live above the aquifer	Live on the top of the aquifer (1) or not (0)	40.33 % lives above the aquifer
Live far from the aquifer	Live far from the aquifer: between 5 and 30 km (1) or not (0)	19.58 % lives far from the aquifer
Bill amount	Water bill amount	Average = 23 �
Tap water frequency	Drink water rarely, several times per week or every day (1) against never (0)	92.77 % of (1)
Well	Has a well (1) or not (0)	18.65 % has a well
Environment cited as main problem	Cite an environment related problem as the main problem in the region (1) or not (0)	78.26 % from respondents accepting to pay cite environment as main problem
Active in an environmental organization	Is active in an environmental organization (1) or not (0)	19.35 % is active in an environmental organization
Patrimony reason	Want to contribute because thinks groundwater is part of the patrimony and as such must be protected (1) or not (0)	60.97 % brings up the patrimony reason
First program possible	Think the first program is possible to implement (1) or not (0)	83 % thinks the first program is reliable
Second program possible	Think the second program is possible to implement (1) or not (0)	55 % thinks the second program is reliable

Table 8. Regression results

	FIRST SCENARIO			SECOND SCENARIO	
	Logistic	Ols on positive amounts	Tobit without protest (marginal effects)	Logistic	Ols (log-log)
Constante	0.08	6.79 (***)	8.23 (***)	0.24	7.27 (***)
Age	-0.027 (***)		-1.24 (**)	0.001	
Low income	-0.75 (**)	-0.297 (**)	-2.15 (***)	-0.67 (**)	-0.32 (**)
Live above the aquifer	0.83 (***)	0.18 (*)	0.98 (**)	-0.25	0.18
Live far from the aquifer		-0.48 (***)	-0.61		-0.35 (**)
Bill amount		0.33 (**)	0.49		0.30 (**)
Tap water frequency		-0.57 (**)	-2.76 (***)		-0.57 (**)
Well	0.73 (**)		0.62	0.39	
Environment cited as main problem	0.64 (**)		1.11 (**)	-0.24	
Active in an environmental organization		0.26 (**)	1.09 (**)		0.20
Patrimony reason		0.25 (**)			0.26 (**)
First program possible	1.56 (***)		2.69 (***)		
Second program possible				1.78 (***)	
Number of observations	354	230	199 (including 52 left-truncated)	228	202
Goodness of fit	Pseudo-R2 = 0.1494	R2 = 0.2099	Pseudo-R2 = 0.0757	Pseudo-R2 = 0.1402	R2=0.1765

the chi-square test rejected such a hypothesis. Concerning the variable “well” and the variable “drink tap water”, the chi-square test can not be implemented⁷. We will make the hypothesis that the two variables are independent. Such a hypothesis is justified because only one respondent having a well drink its water. In addition to that, most of respondents never drinking tap water do so because they do not trust tap water and not because they prefer drink water from another source.

For the regressions on willingness-to-pay amount, explanatory variables, when quantitative, and elicited amounts are logged. It permits to interpret coefficients in term of elasticities. Since the Tobit model is estimated thanks to maximum likelihood, coefficients can not be interpreted. It is for this reason, that marginal effects are reported. They are calculated at the mean of the explanatory variables.

First scenario

The parameter age is negative and statistically different from zero in logistic and Tobit equations. The older respondents are, the lower the probability they pay and the lower the amount they declare (including zeros). But once respondents decided to pay, age has no influence on amount.

Low income is significant at least at the 5% level and has a negative sign, in all models. Households with an income below 835 € would be less willing to pay for the aquifer, which is in the nature of things.

Living on the top of the aquifer has positive coefficient that is significantly different from zero. Among respondents willing to pay (ols), living above the aquifer, increases by 18% willingness to pay. This indicates that such respondents attach a higher value to the aquifer, which is partly due to the use value which is higher for them. Living at more than 5 km of the aquifer even has a more important impact on wtp, since it makes people pay 48% less and is significant at the 1% level instead of 10%.

Low income and living above the aquifer are the two variables, which appear in regression on decision to pay (logistic) and regression on willingness-to-pay amounts -for positive bidders (ols) and for all respondents (Tobit). Their sign and significativity are robust across models.

Among respondents willing to pay (ols), bill elasticity is 0.33, which means if bill amount increase by 10%, then wtp will increase by 3.3%.

Respondents never drinking tap water have a higher willingness to pay than others. Such respondents may be more sensitive to water quality and most of them do not trust tap water. If water quality were perfect, with nitrates concentration as close as possible from natural state, they would probably drink tap water again.

Well is a significant variable for the decision to pay. Even if most of them (86.25%) do not drink its water, around two-third use its water and are

thus in contact with it. It increases direct use value for those who use it and option use value for the others.

Citing environment as one of the main problems in the region makes respondents more ready to pay. This answer is quite subjective. Since the subject of the questionnaire is related to environment, respondents may bias their answer towards environment, because they think it is the “right answer” to the question. This variable is also significantly positive in the Tobit model.

Being active in an environmental organization is also significant in the Tobit model as well as in the regression on positive amounts but not in the logistic. This difference confirms that there is gap between being effectively active in the field of environment and just saying environment is an important problem. Among respondent accepting to pay, involvement increases willingness-to-pay amount by 26%.

Accepting to pay because of the existence value of the aquifer provide higher values. Indeed such non-use considerations come from people having a real interest toward environment protection, not only for financial reasons but because they consider natural places do not have to be depleted by humans.

Confidence in results of the program has a strong relation with the will to pay. It is very important because many respondents do not think the results are achievable, either because politician or the society do not have the will to achieve such an ambitious program, or because they think it is not technically possible.

Coefficients are much more important in the Tobit regression. It is due to the inclusion of zeros in the regression. But the proportion remains the same, since, for example, it is still the drinking of tap water which is the variable with the higher coefficient, like in the ols regression.

Second scenario

Once the decision has been made to pay for ensuring a drinking water quality, the only variable which explains will to pay to ensure no risk to connected protected areas is income. Respondents having a low income who accepted to pay for first scenario are more reluctant to pay for the second one than the other.

Concerning elicited amount, significant variables are the same than for first scenario, except being involvement in an environmental organization and living above the aquifer which does no more explain contribution.

Coefficients are nearly the same, except for the variable “live far from the aquifer”. It diminishes contribution of 35% instead of 48%. Since second scenario does not deal with drinking standards but with environmental issues, respondents living at more than 5 km of the aquifer are more concerned than for the first scenario, which explains a lower negative coefficient. In the same way, the ecological purpose of the second set of measures

explains that living above the aquifer is no more significant.

Testing key assumptions and hypothesis

Way the interview is conducted and level of information

Type of interview (home or street), the interviewer and level of information potentially biases answers.

Home and street interviews do influence neither probability of paying nor the amount declared, if the respondent accepts. Indeed, the overall time spent for doing interviews are quite equal and thus might eliminate possible differences resulting from different interview places.

All interviewers do not obtain the same results. With some interviewers, probability to accept to pay is higher as well as willingness to pay amount. Even if information about current situation, water quality problems and improvement's scenarios were printed on the questionnaires, each one has his own way to explain and present it. It also explains that level of information does not explain answers of respondents. Interviewers can not be stuck to what they should say; there is a dialogue with respondents who often ask complementary information. In addition to that the information does not directly from the description of situation to the answer. There are biases, such as, the way respondents understand the information they get and the way they adapt their opinion to questions which are "closed".

Comprehension of the nature of the good

Contingent valuation is a direct valuation method, since it creates a fictive market to ask directly to respondents the value they accord to an environmental good. Nevertheless, before declaring such an amount, respondents need to clearly understand which good is at stake. Groundwater being, by definition, invisible most of the time, it is very hard to value for many respondents. A key question of the study is to assess to which extent respondents understand what they are valuing.

For people living far from the aquifer, there is independency between use of groundwater and willingness to pay, on one side, and contribution amount, on the other side. This means that respondents considered as a whole understand that the aquifer is quite far away and that its quality has no influence on the water they use. Nevertheless, 38% of respondents living at more than 5 km from the aquifer declare they want to pay in order to avoid future treatment costs. This answer is meaningless because their water supply does not come from the aquifer and will never come from it. In addition to that, it is unlikely they move above the aquifer because the biggest towns are in the circle around it.

For respondents living above the aquifer, those who use groundwater are not more ready to pay

than the other. But users declare higher amounts, which mean they are able to make a relation between improvement of the aquifer quality and the water they drink.

As a conclusion, it is not obvious that respondents understand perfectly which good they value. At least, some of them are not able to establish a right link between the aquifer and the water they use.

Discussion and conclusions

The results obtained from the contingent valuation survey undertaken for the Krško kotlina aquifer (East of Slovenia) illustrates people's willingness to pay for groundwater improvements. Overall, around 63% of the sample is willing to pay an average of 6,6 € per household per month for ensuring groundwater remains drinkable in the longer term. Only 40% of the sample, however, is willing to pay for bringing groundwater back to close-to-natural concentrations of nitrates with an additional 4,8 € per household per month. These amounts represent 15–20% of households' average monthly water bill.

Significant differences in willingness-to-pay values exist between respondents. Living on top of the aquifer, the trust in the program of measures proposed for improving groundwater quality, being member of an environmental organization or putting the preservation of the patrimony as priority justification for groundwater quality restoration positively influence willingness-to-pay values. Also, a higher percentage of respondents with high incomes are ready to contribute to both groundwater improvement programs as compared to the low income group. Furthermore, low income groups will contribute with smaller values. No difference in people's willingness to pay for groundwater improvements was found between the two sub-sample that received different information on the current situation and possible groundwater improvement measures. This might be related to the difficulty for respondents to grasp groundwater issues and to understand rightly the good (changes in groundwater quality) they are asked to value.

Overall, results are coherent with basic assumptions and theory. And they are in line with results obtained from other contingent valuation studies – apart for sex-related differences commonly found in other studies (men being willing to pay more than women) but not valid for the Krško kotlina aquifer. The relatively low overall statistical significance of the regressions obtained is also similar to what is commonly found in other studies – stressing that only part of the variability of respondents' responses can be explained with the information obtained and variables considered.

As indicated in the literature, contingent valuation might not be the best approach to value groundwater quality (because of the difficulty for respondent to understand the good they need to value and that is not visible). However, it re-

mains the only option available for capturing non-use values. The values obtained with this survey could be used for first assessments of benefits from groundwater quality improvements in other Slovenian aquifers *at risk* or *potentially at risk*, leaving additional surveys or methods for obtaining new site-specific values to areas where groundwater improvement is politically sensitive and/or costs and benefits of the same order of magnitude.

The test demonstrates that such contingent valuation surveys can be implemented under Slovenian conditions (protest answers, for example, remain within acceptable limits). Simplification of the questionnaire would be possible if the objective is to estimate total willingness-to-pay values only – as opposed to identifying the relative dependency between willingness-to-pay and different characteristics of respondents. Further testing of valuation methods (contingent valuation, but also hedonic pricing and transport cost methods) would be required for estimating additional values of environmental costs for Slovenia – in particular for other types of waters (surface water, coastal water). In addition to providing estimate of values of environmental costs/benefits, such contingent valuation surveys would contribute to raising people's awareness on water protection and on significant water management issues faced in Slovenia.

Acknowledgement

The financial support of the European Union for undertaking the contingent valuation survey and writing of this paper is acknowledged. The survey and the analysis of results have taken place as part of activities of the project Technical Assistance for the preparation of the Krka river basin management plan located in the Krka sub-basin (EU co-financing EUROPE AID/11881/D/SV/SI) and of the EU-funded BRIDGE project (N° 006538 (SSPI) of the 6th Framework Programme).

References

- EUROPEAN COMMISSION 2002: Economics and the Environment – The Implementation Challenge of the Water Framework Directive. Guidance Document N°1, Common Implementation Strategy, European Commission (Bruxelles).
- GREENE, W. H. 2000: *Econometric Analysis*, 4th Ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- HERMANOWICZ, S.W. 2005: Sustainability in Water Resources Management: Changes in meaning and perception. 6th International Conference. European Water Resources Association, 7–10 September 2005. Palais de l'Europe, Menton (France).
- KALF, F. R. P. & WOOLLEY, D. R. 2004: Applicability and methodology of determining sustainable yield in groundwater systems. *Hydrogeology Journal* (Springer-Verlag) 13: 295–312.
- KLIMATOGRAFIJA SLOVENIJE 1995: *Klimatografija Slovenije – Količina padavin, 1961–1990 (Climatography of Slovenia – Precipitation, 1961–1990)*. Arhiv HMZ (Ljubljana).
- PRESTOR, J. & JANŽA, M. 2006: Ocena višine infiltracije (po metodi Kennessy) in ranljivosti podzemne vode na območju Slovenije (*Evaluation of infiltration rate (after Kennessy) and vulnerability of groundwater in Slovenia*). Arhiv GeoZS (Ljubljana).

¹ The Krka Pilot project or the *Technical Assistance for the preparation of the Krka river basin management plan located in the Krka sub-basin* is co-financed by the European Union (PHARE funding). It aims at testing methods and tools for supporting the implementation of the new Water Law/EU WFD and the development of river basin management plans in Slovenia. It has been implemented by a consortium led by Hidroinženiring d.o.o. (Slovenia), with ECORYS Nederland (The Netherlands) and IEI d.o.o. (Slovenia) as members of the consortium.

² "Stratégie d'échantillonnage et modèles de comptage dans la méthode des coûts de transport." Sébastien Terra, MEDD.

³ "The value of trees, water and open space as reflected by house prices in the Netherland", Luttk.

⁴ (Estimated value – actual transaction price)*100/estimated price

⁵ Pre-testing was performed for two consecutive days beginning of April 2006. Around 50 respondents from the Ljubljana and Krško kotlina areas were interviewed with changes and improvements made to the original questionnaires to account to respondent's first responses and reactions. Pre-testing was also instrumental in training interviewers in the use of the questionnaire.

⁶ Total wtp = wtp for first scenario+wtp for second scenario if both are different of zero. Indeed second wtp is expressed on top of the first one.

⁷ Chi-square test can not be implemented when one box of the contingent table contains less than 5% of the sample.

Pregled sledenja voda z umetnimi sledili na kraških območjih v Sloveniji

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

Metka PETRIČ

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

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

Ključne besede: sledenje, umetno sledilo, kras, Slovenija

Key words: tracing, artificial tracer, karst, Slovenia

Izvleček

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

Abstract

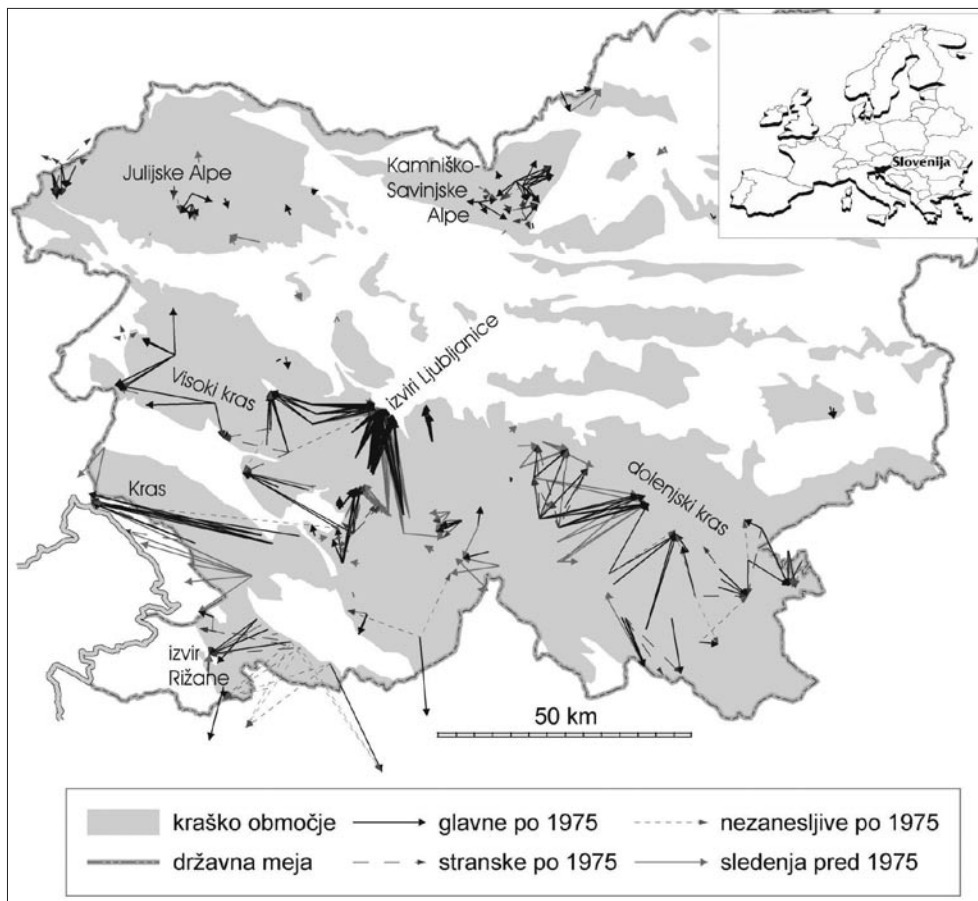
Reports on more than two hundred performed tracer tests with artificial tracers on karst areas in Slovenia have been published in national and international professional publications since the beginning of 20th century. Based on the review of collected data, the results of the tracer tests, which were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

Uvod

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

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

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



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

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

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

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

Pregled opravljenih sledenj z umetnimi sledili na kraških območjih v Sloveniji

Objavljeni pregledi po posameznih obdobjih

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Novejša sledenja v obdobju med 1989 in 2008

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Značilnosti opisanih sledenj

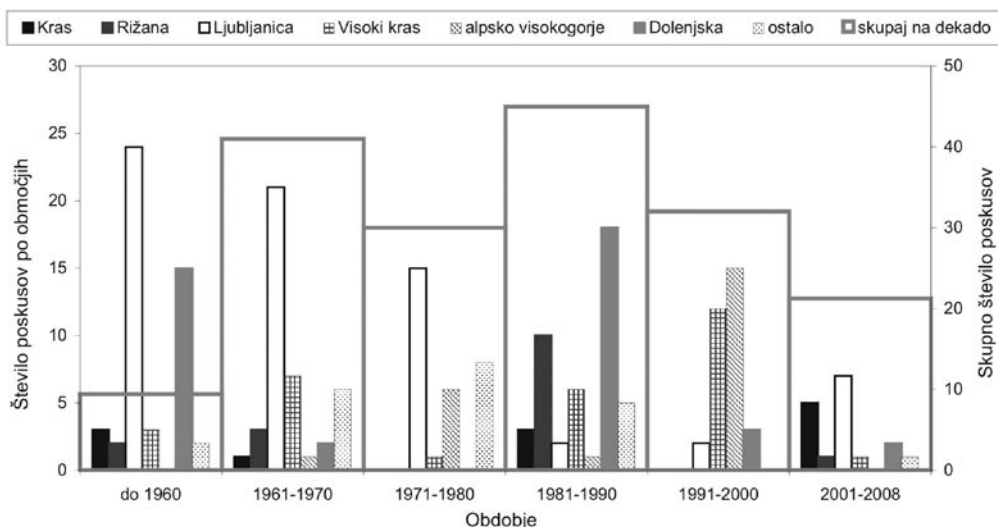
Časovna in prostorska razporeditev opravljenih sledenj

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

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

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

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



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

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

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

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

Namen sledilnih poskusov in njihovi izvajalci

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

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

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

Točke injiciranja

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

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

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

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

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

Uporabljena sledila

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

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

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

2005). Z namenom podrobne študije značilnosti toka v zgornji vadozni coni so pri prvem poskusu injicirali mešanico 6 sledil (NaCl, KCl, MnCl₂, CuSO₄ · 5H₂O, NiSO₄ · 6H₂O, uranin), pri drugem pa še mešanico 11 sledil (fluorescentna barvila, soli, devterij, mikrozrna, bakteriofagi).

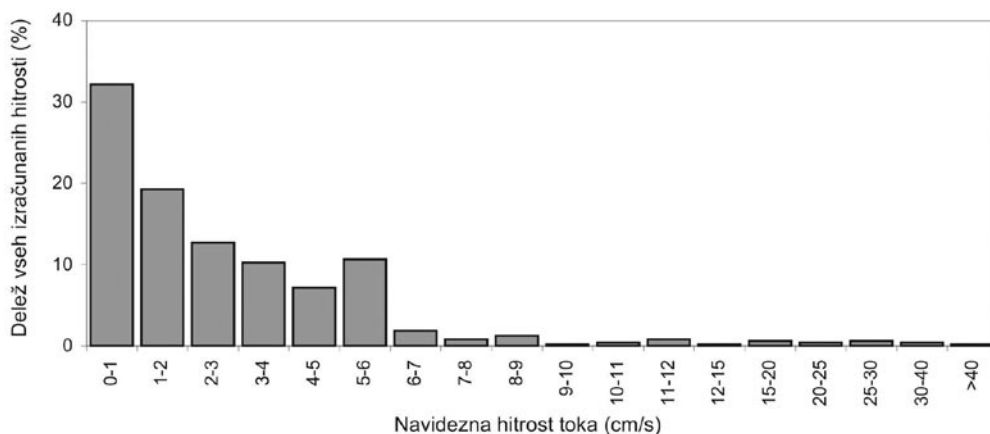
Količina uporabljenega sledila se bistveno razlikuje glede na tip sledila, za isto sledilo pa glede na hidrološke razmere in velikost izvirov, v katerih naj bi se po predhodnih ocenah pojavilo. Z razvojem novih naprav za detekcijo, ki danes omogočajo zaznavanje že pri zelo nizkih in prostemu očesu seveda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

Trajanje poskusa

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

Ugotovljene navidezne hitrosti in delež povrnjenega sledila

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



Sl. 3. Razporeditev izračunanih navideznih hitrosti podzemnega pretakanja

Fig. 3. Distribution of calculated apparent groundwater flow velocities

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

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

Sklepi

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

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

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

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

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

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

Literatura

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

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

Hidrogeologija Vetrovne jame v vodonosniku severno od Planinskega polja

Hydrogeology of the cave Vetrovna jama in karst aquifer north from Planinsko polje (Notranjska region, central Slovenia)

Janez TURK & Franci GABROVŠEK

Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Titov trg 2, SI-6230 Postojna, Slovenija; e-mail: janez.turk@zrc-sazu.si; gabrovsek@zrc-sazu.si

Prejeto / Received 11. 11. 2008; Sprejeto / Accepted 12. 2. 2009

Ključne besede: Vetrovna jama, Slavendolski prelom, udornice, Laška kukava, Gradišnica, kraški vodonosnik, Planinsko polje, podzemna Unica, Slovenija

Key words: Vetrovna jama cave, Slavendol fault, collapse doline, Laška kukava, Gradišnica cave, karst aquifer, Planinsko polje, underground Unica river, Slovenia

Izvleček

V Vetrovni jami smo eno leto merili nivo in temperaturo podzemne vode, da bi ugotavljali njen izvor in hidravlične značilnosti pretakanja. Jama se nahaja le 2,7 km severno od Planinskega polja in jo napaja reka Unica. Proti pričakovanju v njej nismo neposredno zaznali podzemnega toka, ki priteka iz požiralnikov na dnu Cerkniškega jezera. Hidrograme iz Vetrovne jame smo primerjali s hidrogrami v nekaterih drugih jamah v istem vodonosniku. Hidrogrami iz Vetrovne jame so le deloma primerljivi s hidrogrami v ostalih jamah, korelacija ni statistično značilna. Na podlagi tega in še nekaterih drugih dejstev smo sklepali, da je pretakanje med »vzhodnim« in »zahodnim« delom vodonosnika severno od Planinskega polja omejeno. Odtekanje vode iz Vetrovne jame je močno odvisno tudi od lokalnih hidrogeoloških preprek, kot je podor pod udornico Laška kukava.

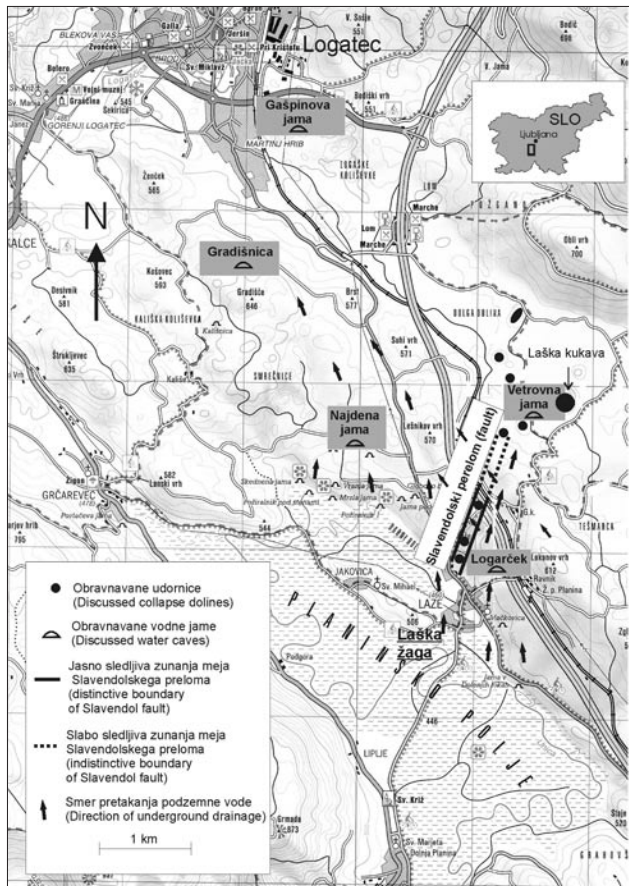
Abstract

For one year we have been measuring level and temperature of underground water in Vetrovna jama, to find out the origin of underground water and hydraulic characteristics of the cave and karst aquifer north east of Planinsko polje (karst of Notranjska region, central Slovenia). Similar parameters as in Vetrovna jama were measured also at the Unica River and at the Cerknica Lake. Cave is located only 2.7 km north from the polje and is fed by the Unica River, according to measurements. But in contrast with our expectations, we did not directly detect underground water flow, which drains from the Cerknica Lake. Hydrographs measured in Vetrovna jama were compared with those measured in some other caves within the aquifer. Hydrographs from Vetrovna jama are only partly comparable with hydrographs obtained in other monitored caves, as comparison shows no statistical significant correlation. Final conclusion would be that drainage of water between "eastern" and "western" part of karst aquifer is limited. Moreover, outflow from Vetrovna jama strongly depends on local hydrogeological restriction, such as supposed rockfall under Laška kukava collapse doline.

Uvod

Vetrovna jama se nahaja na območju Laškega ravnika, SV od Planinskega polja, v neposredni bližini velike udornice Laška kukava. Jama je zelo pomembna s hidrogeološkega vidika, kar je predvsem posledica njene lege. Gre za najbolj vzhodno izmed maloštevilnih znanih vodnih jam na raziskanem območju (sl. 1). Skupaj z Gradišnico in Gašpinovo jamo spada med tri znane vodne jame, ki so relativno oddaljene od obrobja Planinskega polja. Zračna razdalja med severovzhodnim robom polja in Vetrovno jamo znaša slabe tri ki-

lometre. Voda iz jame odteka pod udornico Laška kukava, ki je ena največjih udornic na Notranjskem krasu (sl. 2). Zaradi svojstvene lege in predvsem nekaterih hidrogeoloških posebnosti smo se odločili, da Vetrovni jami posvetimo posebno obravnavo. Raziskave so sicer istočasno potekale tudi v Gradišnici in Gašpinovi jami (TURK, 2008) ter v Najdeni jami. Vse omenjene jame in celotno obravnavano območje Ravnika pripadajo kraškemu porečju Ljubljaniče, ki obsega površinske in podzemne vode od Babnega polja in Pivške kotline na jugu, do roba Ljubljanskega barja na severu.



Slika 1. Zemljevid območja s položajem raziskanih vodnih, kraških jam. Vir: Izletniška karta Notranjski kras 1 : 50 000, Geodetski zavod Slovenije.

Figure 1. Geographical map of studied area with discussed investigated water caves.

Namen hidrogeoloških raziskav v Vetrovni in ostalih treh jamah je bil preučiti hidrogeološke in hidravlične značilnosti vodonosnika vzdolž Planinskega polja. V prispevku poskušamo razložiti nekatere hidrogeološke odvisnosti med Vetrovno jamo in ostalimi tremi jamami zahodno od nje (Najdeno jamo, Gradišnico in Gašpinovo jamo, sl. 1). Želeli smo tudi potrditi napajanje Vetrovne jame z Unico in preveriti morebitno napajanje oziroma interakcijo s podzemno vodo, ki prihaja iz Cerkniskega jezera.

Opis sistema in predhodne raziskave

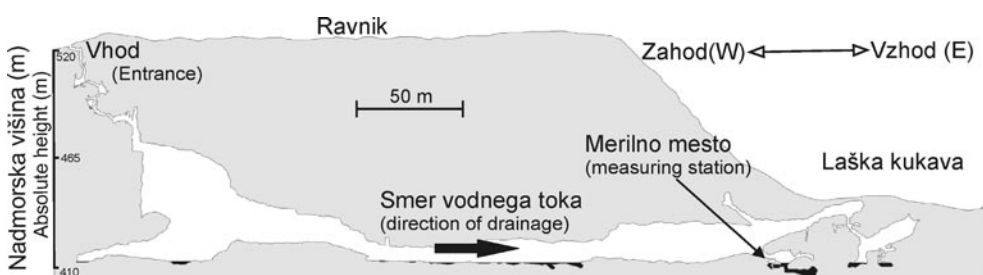
Širše območje Ravnika, na katerega je vezana Vetrovna jama, gradijo dobro zakraseli apnenci in dolomiti kredne starosti, v katerih prevladuje kanalska poroznost (GOSPODARIČ & HABIČ, 1976). Ti v

smeri proti Ljubljanskemu barju oziroma izvirom Ljubljanice prehajajo v apnence in dolomite jurske starosti. Celotno območje pripada monoklinali z vpadom plasti 25° do 30° proti zahodu (PLENIČAR et al., 1970).

Območje je bilo velikokrat predmet raziskovalnega dela, katerega glavni namen je bil ugotavljanje podzemnega pretakanja vode oziroma vpliva geoloških struktur na hidrogeologijo. ČAR (1982) je z geološkim kartiranjem ugotovil, da so kamnine med obrobjem Planinskega polja in Ravnikom tektonsko dobro pretrte. Požiralniki na obrobju polja, v katere ponika površinska Unica, so genetsko povezani s prelomnimi conami in plastovitostjo karbonatov. Podzemne vodne poti potekajo bodisi skozi lezike v plastnatem krednem apnencu, bodisi skozi porušene ter razpoklinske cone, ki potekajo večinoma proti SV. Ob teh dobro prevodnih strukturah so nastali požiralniki, ki se nahajajo na vzhodnem območju Planinskega polja, JV od Laz (kot so Ribce, Žrnki, Milavčevi ključi in Dolenje Loke). Vsi ti požiralniki so potencialno pomembni za napajanje Vetrovne jame, saj se voda iz Unice, ki ponika vanje, skozi Ravniki pretaka proti izvirom Ljubljanice na severu. To je dokazal kombiniran sledilni poskus v letih 1972–1975 (GOSPODARIČ & HABIČ, 1976). Dokazane so bile zveze z izviri Lubije, Velike Ljubljanice in Bistre, vsi ti potoki se na Ljubljanskem barju združijo v reko Ljubljanico.

S tezo, da je pretakanje podzemne vode skozi Ravniki pogojeno predvsem tektonsko, se strinja tudi ŠUŠTERŠIČ (2002). Določil je dve smeri prelomov (SV–JZ in SZ–JV). Prelomi s 100 m ali več širokimi zdrobljenimi conami naj bi predstavljali hidrogeološke prepreke, ki pomembno vplivajo na pretakanje vode v vodonosniku. Po mnenju ŠUŠTERŠIČA in sodelavcev (2001) je relativno raven niz udornic med Slaven in Voden dolom vezan na takšno zdrobljeno cono, ki so jo poimenovali Slavendolski prelom. Ta zdrobljena cona naj ne bi dovoljevala nastanka večjih prečnih kraških kanalov. Unica, ki ponika vzhodno od nje, naj bi se torej generalno pretakala ob njej, v smeri proti severu. Tej domnevi v prid govori tudi lega vodne jame Logarček, ki se je izoblikovala vzhodno od Slavendolskega preloma. Njeni rovi generalno potekajo vzporedno s prelomno cono (ŠUŠTERŠIČ et al., 2001). Vendar pa ŠUŠTERŠIČ (2002) hkrati meni, da je stičišče dveh zdrobljenih con dobro hidrogeološko prevodno. Vetrovna jama naj bi ležala v neposredni bližini takšnega stičišča, od koder bi po tej hipotezi lahko v jamo pritekala podzemna Unica.

V vodonosnik ob Planinskem polju in posledično v Vetrovno jamo zagotovo priteka tudi voda iz



Slika 2. Prerez Vetrovne jame z označeno lokacijo merilne postaje. Avtor načrta je Miran Nagode.

Figure 2. Longitudinal cross section of Vetrovna jama with measuring station marked. Author of the sketch is Miran Nagode.

drugih virov, vendar predstavlja Unica poglavitni dotok. Skupna prevodna sposobnost požiralnikov JV od Laz je omejena na 20 m³/s (BREZNIK, 1998), sposobna je odvesti le nizke in večino srednjih voda Unice (ŠUŠTERŠIČ, 2002). Ob visokih vodah pa pomemben del Unice nadaljuje svojo pot proti končnim požiralnikom na severu polja (sl. 1).

Ostala znana vodna vira, ki pritekata v vodonosnik, sta avtogeni dotok preko dobro prepustnega površja Ravnika in podzemni tok, ki se napaja iz Cerknškega jezera. Vendar o razporeditvi podzemnega toka iz Cerknškega jezera, katerega maksimalni pretoki so bili ocenjeni na 6 m³/s glede na prevodno sposobnost požiralnikov (GAMS & HABIČ, 1987), do sedaj ni bilo resnejše znanstvene razprave. Sklepajo, da se ta tok pretaka skozi jurske apnenice in dolomite (v katere tudi ponika) in da doseže boljše zakrasele kredne kamnine Ravnika šele nizvodno od Vetrovne jame (KRIVIC et al., 1976). Sledilni poizkus je pokazal, da ta tok napaja predvsem izvire Bistre in deloma Velike Ljubljanice ter Lubije (GOSPODARIČ & HABIČ, 1976).

V obravnavanem območju je mikrolokacija Vetrovne jame vezana na območje udornic, ki so razmeroma pogost pojav na Ravniku. Jama je z udornicami obkrožena kar s treh strani. Na odtočni strani se pojavlja ena večjih udornic na Notranjskem krasu, Laška kukava. Njena globina znaša blizu 100 m, volumen pa ji je ŠUŠTERŠIČ (2000) ocenil na 4,17 milijonov kubičnih metrov.

Nastanek udornic na območju Ravnika so prvotno razlagali s hidrogeološkimi procesi oziroma s pretakanjem podzemne vode (MICHLER, 1954–1955). Novejša dognanja pa kažejo, da določene udornice (kot tiste med Slaven in Voden dolom) niso vezane zgolj na hidrogeološke procese, pač je na njihov nastanek vsaj posredno pripomogla tudi tektonska dejavnost (ŠUŠTERŠIČ, 2002). Udornice so posledica podiranja nad jamskimi prostori ali postopnega odnašanja kamnine nad aktivnimi jamskimi rovi (PALMER & PALMER, 2006; STEPIŠNIK, 2006). Intenziteta podiranja oz. poglobljanja je večja tam, kjer je debelina stropa manjša, oziroma je dno udornice razmeroma blizu kanalskim prevodnikom. Dno Laške kukave se nahaja le nekaj metrov nad stropom skrajno znanih nizvodnih delov Vetrovne jame, torej verjetnost podora tod obstaja (sl. 2).

V kolikor relativno velik podor zapre vodno pot aktivnemu jamskemu sistemu, ločimo več hidrogeoloških razvojnih faz. Voda si sprva skuša utreti pot skozi porozni, podorni material, sčasoma raztaplja in odnaša material (predvsem ob poplavnih sunkih), v primeru nadaljnega podiranja pa si utre novo vodno pot, ki se izogne podoru (PALMER & PALMER, 2006; XUWEN & WEIHAL, 2006; ŠEBELA, 1998). Kateri razvojni fazi pripada pretakanje vode iz Vetrovne jame pod Laško kukavo (če sploh kateri) je zaenkrat še neznano, saj freatična zanka pod Laško kukavo še ni bila raziskana.

Metodologija

Naša raziskava temelji na zveznem merjenju vodnih nivojev in temperature podzemne vode. Za

potrebe hidrogeoloških raziskav na slovenskem krasu uporabljamo avtomatične merilce imenovane »Diver-ji«, ki v izbranem časovnem intervalu merijo in beležijo tlak in temperaturo vode (GABROVŠEK & PERIC, 2006; TURK, 2008). Časovni interval meritve smo nastavili na pol ure. Merilec smo v Vetrovni jami namestili v odtočno jezero pod Laško kukavo, na absolutni nadmorski višini 410 m (sl. 2).

Zvezno smo merili vodni nivo ter temperaturo podzemne in površinske vode. Meritve v Vetrovni jami so potekale v dveh fazah, in sicer v obdobju junij 2006 – januar 2007, ter med aprilom in decembrom 2007. V prvem obdobju smo hkrati merili tudi pretoke in temperaturo Unice pri Starem gradu, ki se nahaja pred prvim pomembnim požiralnikom. V drugem obdobju smo poleg parametrov Unice merili še nihanje vodnega nivoja in temperaturo Cerknškega jezera (v požiralniku »Rešeta«). Skoraj ves čas smo merili hidrogeološke parametre tudi v Gradišnici, Gašpinovi jami in Najdeni jami (sl. 1). Vse izmerjene parametre smo primerjali med seboj.

Rezultati

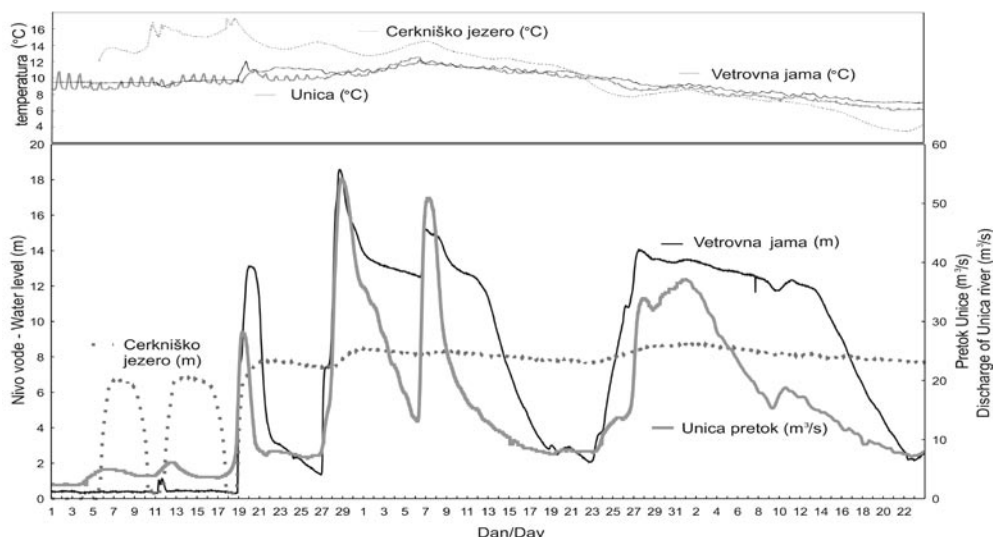
Površinski izvor vode, ki doteka v Vetrovno jamo smo preverjali na dveh območjih: Unici na Planinskem polju in na Cerknškem jezeru. Prva vodna zveza bi bila logična navezava na predhodna dognanja (GOSPODARIČ & HABIČ 1976; KRIVIC et al., 1976), medtem ko je bila druga vodna zveza velika neznanka.

Napajanja z jezersko vodo nismo neposredno zaznali, saj primerjava nivojskih hidrogramov iz Cerknškega jezera in iz Vetrovne jame ni pokazala jasne medsebojne povezave (sl. 3, $r = 0,60$). Podobno velja tudi za temperaturno primerjavo, ki kaže določene podobnosti, vendar so te posledica regionalnih klimatskih razmer. Povezava s Cerknškim jezerom torej ostaja nepojasnjena.

Zveza med pretočno krivuljo Unice in nivojskim hidrogramom v Vetrovni jami je pričakovano statistično značilna (sl. 3, $r = 0,85$). Da pripada podzemna voda, ki se pretaka skozi jamo, resnično Unici, dokazujejo tudi dnevna temperaturna nihanja značilna za površinske vodotoke. Nihanja so popolnoma enaka kot pri Unici (sl. 3).

Primerjava nivojskih hidrogramov iz Vetrovne jame in Gradišnice kaže, da se poplavna voda pri vseh izrazitejših poplavnih sunkih dalj časa zadržuje v Vetrovni jami (sl. 4). Vodna gladina v Gradišnici, kot tudi v Gašpinovi in Najdeni jami upada razmeroma hitreje. Upadanje je dobro usklajeno z upadanjem pretoka površinske Unice, medtem ko upadanje vodnih nivojev v Vetrovni jami na določenih odsekih ne kaže neposredne povezave s površinskim pretokom Unice in je izrazito upočasnjeno. Posledično primerjava hidrogramov med Vetrovno in ostalimi jamami ne kaže nikakršne medsebojne povezanosti, vsaj v fazi upadanja ne. V članku so prikazane le primerjave z Gradišnico.

Znano je, da Unica vstopa v Vetrovno jamo prek požiralnikov na vzhodnem obrobju polja, JV od Laz, (sl. 1). Hidrogeološki odziv jame na poplavne sunke Unice smo v grobem razdelili na dva dela.



Slika 3. Hidrogrami Cerknika jezera, reke Unice in Vetrovne jame v obdobju med 1.9. in 24. 12. 2007.

Figure 3. Hydrographs of the Cerknica lake, the Unica river and the Vetrovna jama in period between September 1st and December 24th, 2007.

Delitev temelji na velikostnem redu (maksimalnem pretoku) poplavnih sunkov površinske Unice, ki v celoti ali deloma vstopajo v vzhodno skupino požiralnikov.

1. Veliki poplavni sunki ustrezajo tistim površinskim pretokom Unice, ki so večji od 30 m³/s. Prehajanje vseh takšnih relativno velikih poplavnih sunkov skozi Vetrovno jamo je ovirano, zaradi česar pride do daljšega zadrževanja poplavne vode v jami. V vseh primerih na hidrogramu opazujemo značilen vzorec: relativno počasno upadanje nivoja podzemne vode med točno določenima relativnima višinama, zaradi česar je Vetrovna jama zalita s poplavno vodo dalj časa v primerjavi s tremi obravnavanimi jamami zahodno od nje. Takšen vzorec smo v Vetrovni jami opazovali pri vseh štirih velikih poplavnih sunkih (oziroma šestih če zanemarimo delno prekrivanje nekaterih sunkov). Povečano prikazan je primer iz konca septembra oziroma oktobra 2007 (sl. 5).
2. Relativno majhni poplavni sunki ustrezajo pretokom površinske Unice, ki ne presegajo 25 m³/s oziroma 30 m³/s. Majhni poplavni sunki bodisi hitro in razmeroma neovirano preidejo skozi Vetrovno jamo (6 od skupno 10 analiziranih sunkov), bodisi je odtekanje poplavne vode moteno in razmeroma dolgotrajno (4 od 10).

Tipičen primer malega poplavnega sunka, ki neovirano preide skozi Vetrovno jamo, je sunek iz novembra 2006 (sl. 6). Korelacija med pretokom površinske Unice in nivojskim hidrogramom v Vetrovni jami je statistično značilna ($r = 0,81$).

Dva primerljivo velika poplavna sunka, ki ju uvrščamo med male, lahko povzročita različen odziv Vetrovne jame. Praznjenje je upočasnjeno, v kolikor v vodonosniku pred prihodom sunka ni prevladoval bazni tok (primerjaj sunek med 1. – 16. 1. 2008 slika 4a s sunkom med 19. – 22. 9. 2007 slika 4b).

Razprava

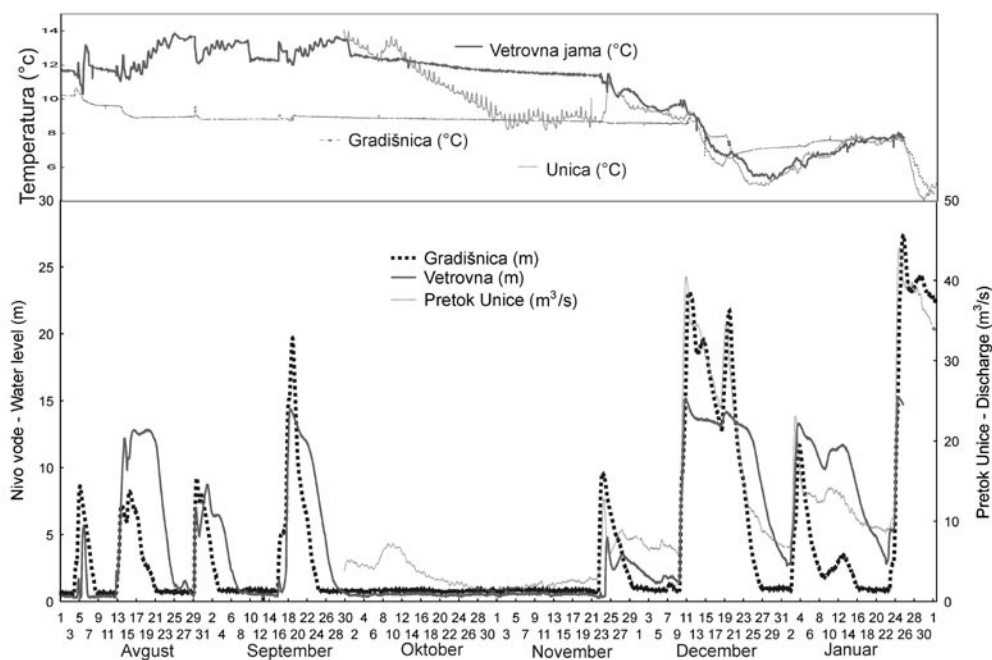
Na podlagi interpretacije meritev lahko sklepamo na lokalni hidrogeološki pomen Vetrovne jame

in na regionalne značilnosti vodonosnika ob Planinskem polju.

Lokalna hidrogeološka študija Vetrovne jame kaže pomembno posebnost, ki se odraža pri prehodu vseh velikih poplavnih sunkov skozi sistem. Relativno neoviran prehod takšnih sunkov skozi Vetrovno jamo, preprečuje domnevna hidrogeološka prepreka nizvodno od nje, zaradi česar prihaja do daljšega zadrževanja poplavne vode v sistemu. Na lokalno hidrogeološko prepreko sklepamo v neposredni bližini jame, kjer dopuščamo možnost, da odtok vode pod udornico Laška kukava pogojuje domnevni skalni podor.

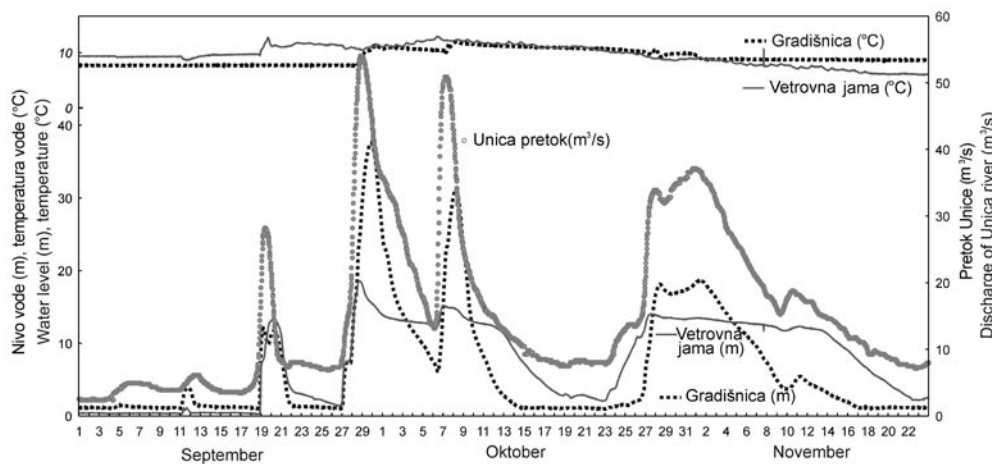
Polnjenje Vetrovne jame s poplavno vodo ne kaže večjih posebnosti, izjema so določeni prevoji na hidrogramih, ki pa ne kažejo korelacije s pretokom površinske Unice. Prevojem sledi upočasnjena hitrost naraščanja vodnega nivoja na določeni relativni višini. V treh primerih smo upočasnjeno naraščanje opazili med relativnima višinama 5 in 6 m, ter v dveh primerih med relativnima višinama 7 in 8 m (sl. 4 in sl. 5 – 26. september). Upočasnjeno naraščanje vodne gladine v Vetrovni jami na določenih relativnih višinah bi lahko bilo pogojeno s prisotnostjo večjih rezervoarjev na območju obravnavanih nivojev.

Bolj kompleksno je odtekanje poplavne vode iz Vetrovne jame. Praznjenje običajno poteka v dveh ali treh fazah, odvisno od največjega doseženega nivoja podzemne vode. V prvi fazi upada vodna gladina izrazito počasneje kot v znanih vodnih jamah zahodneje, torej sta odtok in dotok v jami približno enaka. Domnevamo, da je dotok v tej fazi upadanja razmeroma stalen in kontroliran z maksimalno prevodno sposobnostjo požiralnikov, ki so aktivni ob določenem vodostaju na Planinskem polju. Velikost dotoka ocenjujemo približno na 20 m³/s, kolikor tudi znaša ocena maksimalne prevodne sposobnosti požiralnikov JV od Laz (BREZNIK, 1998). Da je maksimalna prevodna sposobnost požiralnikov ob večjih poplavnih sunkih presežena, dokazuje tudi dejstvo, da so maksimalni vodni nivoji v Vetrovni jami doseženi vsaj nekaj ur preden doseže površinska Unica svoj maksimalni pretok (sl. 5 prvi vrh, ter še posebno sl. 7).



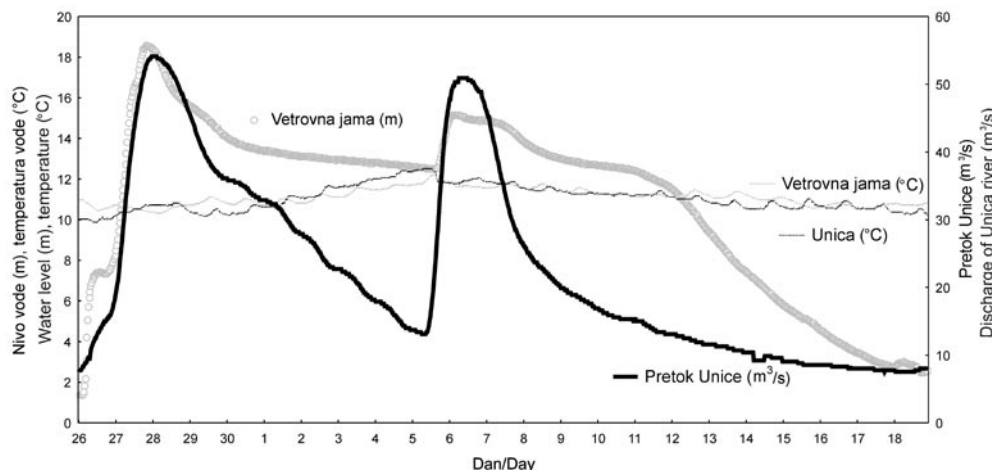
Slika 4a. Primerjava hidrogramov (nivojev podzemne vode in njene temperature) v Vetrovni jami in Gradišnici med 1. 8. 2006 in 1. 2. 2007. Pretok in temperatura površinske Unice sta bila merjena od konca septembra naprej.

Figure 4a. Comparison of hydrographs (parameters of water level and water temperature) in Vetrovna jama and Gradišnica caves, between August 1st 2006 and February 1st 2007. Discharge and temperature of the Unica river was measured on from the end of the September.



Slika 4b. Primerjava hidrogramov (nivojev in temperature podzemne vode) v Vetrovni jami in Gradišnici, v obdobju med 1. 9. in 24. 11. 2007. Prikazan je tudi pretok Unice.

Figure 4b. Comparison of hydrographs (water levels and water temperatures) in Vetrovna jama and Gradišnica caves for period between September 1st and November 24th, 2007. Discharge of the Unica river is also plotted.



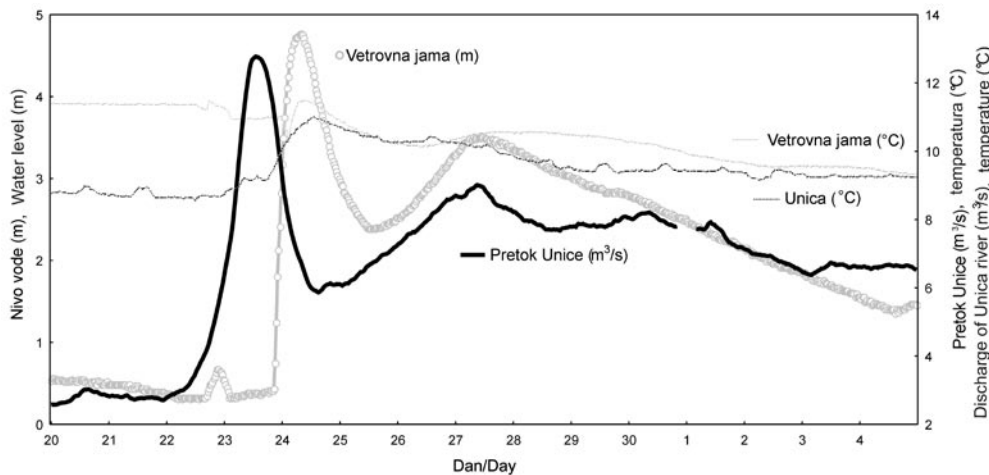
Slika 5. Dva zaporedna poplavna sunka med 26. 9. in 18. 10. 2007.

Figure 5. Two successive flood pulses between September 26th and October 18th, 2007.

Ob izjemno velikih poplavnih sunkih se voda v strugah požiralnikov dviga in verjetno aktivira še dodatne požiralnike, nanizane na višji višini.

V naslednji fazi upadanja gladine vode v Vetrovni jami se nivo vode približa relativni višini 12 m (sl. 5, 12. okt. in sl. 7, 7. do 14. nov.), istočasno pa se hitrost praznjenja Vetrovne jame poveča za več velikostnih redov. Prevojnata točka na hidrogramu v vseh primerih sovpada s pretokom površinske Unice pri 15 m³/

s. Hitro praznjenje je posledica zmanjšane dotoka v jamo, ki sovpada z upadanjem pretoka Unice. Vzrok gre morebiti iskati v strukturi (razvejanega) kanalskega sistema. Ne izključujemo tudi možnosti, da se neposreden dotok v jamo izrazito zmanjša zaradi presahnitve pomembnega požiralnika. Vendar dotok vsekakor ne presahne popolnoma, saj se temperaturne značilnosti Unice v jami ohranjajo tudi v času hitrega upadanja vodnega nivoja.



Slika 6. »Mali« poplavni sunek med 20. 11. in 5. 12. 2006.

Figure 6. "Small" flood pulse between November 20th and December 5th, 2006.

Regionalna umestitev Vetrovne jame znotraj vodonosnika temelji na primerjavi hidrogramov med Vetrovno jamo in drugimi jamami ter na geološki zgradbi območja.

Odziv vodnih nivojev v Vetrovni jami na poplavne sunke je precej drugačen od odziva vodnih nivojev v jamah zahodno in SZ od nje (npr. Najdena jama, Gradišnica in Gašpinova jama).

Na podlagi tega bi lahko sklepali da se Unica, ki napaja vzhodne požiralnike in posledično Vetrovno jamo, pretaka skoraj izključno v smeri proti severu in da torej ne vpliva na vodostaj v treh obravnavanih jamah na zahodu. Dobro prevodnih struktur (kanalov), ki bi potekale v smeri proti zahodu naj ne bi bilo. To bi pomenilo, da zaradi zmanjšane odtočne sposobnosti pod Laško kukavo, poplavna voda ne zastaja le v Vetrovni jami, temveč v neznanem obsegu tudi v gorvodnem delu vodonosnika, v smeri proti požiralnikom na jugu. Tu vmes se nahaja tudi jama Logarček, v kateri meritev sicer nismo izvajali (sl. 1). Hidravlični gradient od Logarčka proti Vetrovni jami je znaten, vendar pa občasna opažanja kažejo, da so nihanja podzemne vode v Logarčku podobnega velikostnega reda kot v Vetrovni jami (GOSPODARIČ & HABIČ, 1976).

Določene povezave med vzhodnimi požiralniki in Gradišnico na SZ so vendarle zanesljive (TURK, 2008). Neznane, vendar nedvomne vodne zveze med vzhodno skupino požiralnikov in Gradišnico skušamo razložiti z detajlno študijo hidrogramov. Ta je pokazala jasno odvisnost med pojavom sekundarnih poplavnih sunkov v Gradišnici (ter tudi Gašpinovi jami) in pretokom površinske Unice, ter tudi vodostajem v Vetrovni jami. Drugače povedano, vpliv podzemne Unice, ki vstopa v vzhodne požiralnike, lahko v Gradišnici opazujemo le ob določenih pogojih:

- Pretok Unice mora biti pravšen (nad 15 in pod 30 m³/s). V tem razponu pretokov se prevodna sposobnost vzhodnih požiralnikov približuje maksimalni vrednosti, oziroma je ta dosežena.
- Pojav vseh tistih sekundarnih vrhov na hidrogramih zabeleženih v Gradišnici, ki jih nikakor ne moremo korelirati s padavinami v širšem območju (Planinsko polje, Ravnik, Rovte), sovpada s počasno fazo upadanja vodnega nivoja v Vetrovni jami, ki poteka med relativnima viši-

nama 12–15 m (absolutno 422–425 m) (sl. 7, glej uokvirjen del slike med 9. in 14. novembrom). Čeprav razpolagamo le s petimi primeri, menimo da je povezava statistično značilna.

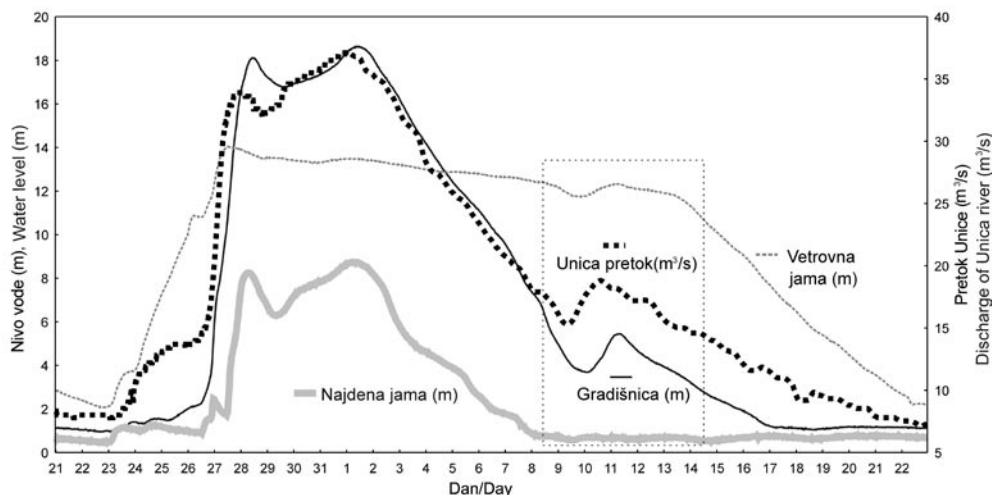
Ob upoštevanju teh dejstev, podajamo dve, razmeroma logični razlagi o vodnih zvezah. Razpravo puščamo odprto, saj dopuščamo možnost dodatnih razlag.

Najverjetnejši razlagi sta sledeči:

1. Ponor Laška žaga (zadnji, skrajno »zahoden« ponor v skupini vzhodnih požiralnikov) v neposredni bližini Laz (sl. 1) bi domnevno lahko odvajal vodo v nekoliko drugačni smeri kot ostali ponori JV od Laz. Obstajajo močni sumi, da je odvajanje vode, ki ponika v Laško žago, pod vplivom določenih geoloških struktur, zaradi česar bi se podzemna voda generalno pretakala v smeri JV–SZ, v nasprotju z ostalimi vzhodnimi ponori, ki naj bi odvajali vodo v generalni smeri J–S. Prevodniki, ki potekajo iz ponora Laška žaga, bi se potemtakem lahko izognili Vetrovni jami, skoraj zagotovo se podzemna voda iz Laške žage pretaka proti Gradišnici. Ob določenih hidroloških pogojih bi ta ponor lahko imel pomemben vpliv na hidrogram v Gradišnici. O pomenu tega ponora in njegovi kapaciteti nismo zasledili dovolj podatkov za detajlnejšo študijo, vsekakor bi ga bilo v prihodnosti koristno preučiti.
2. Domnevamo, da se del podzemne vode, ki naj bi se generalno pretakala od vzhodnih požiralnikov proti severu oziroma Vetrovni jami, na odseku med požiralniki in jama pretoči bočno na zahod (sl. 1). Ta del vode naj bi vplival na nivo vode v Gradišnici in Gašpinovi jami.

Teza o obstoju bočnih prevodnikov je popolnoma hipotetična, utemeljujemo jo s sledečimi dejstvi:

- Le dva od šestih velikih poplavnih sunkov sta povzročila relativni dvig nivoja podzemne vode nad 15 m v Vetrovni jami (natančneje na 18,5 in 19,5 m). V ostalih štirih primerih je nivo narasel za 14 do 15 m, čeprav je bila jakost poplavnih sunkov glede na pretok Unice različna (sl. 4). Dejstvo, da dvig nivoja podzemne vode relativno



Slika 7. Domnevno bočno pretakanje iz glavne smeri odvodnjavanja J-S (med požiralniki pri Lazah in Vetrovno jamo) proti zahodu (v smeri Gradišnice), naj bi se vršilo ves čas, ko nivo podzemne vode v Vetrovni jami presega relativno višino 12 m. Pretok Unice je bil med 27. 10. in 7. 11. dovolj velik, da je napajala končne severne požiralnike, ter posledično Najdeno jamo in Gradišnico. Ta dotok je na hidrogramu v Gradišnici v omenjenem obdobju prevladujoč, tako da prekrije vse ostale dotoke, vključno s tistim, ki prihaja iz požiralnika Laška žaga, ali tistim ki se domnevno

bočno pretoči nekje med požiralniki pri Lazah in Vetrovno jamo. Sekundarni poplavni sunek med 10. in 13. novembrom (primer je na sliki uokvirjen) je bil premajhen, da bi napajal Gradišnico prek Najdene jame. Slednja se na dogodek ni odzvala. Pač pa se je izrazito odzvala Gradišnica, ter nekoliko manj izrazito Vetrovna jama. Menimo da se je večina tega poplavnega sunka pretočila preko Laške žage in preko bočnih, stranskih prevodnikov proti Gradišnici in da je le v manjši meri dosegel Vetrovno jamo.

Figure 7. Assumable lateral drainage, which would diverge from main underground pathway directed S-N, assumably takes place all the time, when water level in Vetrovna jama remains above relative height 12 m. Discharge of the Unica river was high enough between October 27th and November 7th to recharge final northern ponors and Najdena jama, Gradišnica caves consequently. This inflow is prevailing one in Gradišnica. All other inflows are blurred on the hydrograph because of this reason, including the inflow from "Laška žaga ponor" or inflow which assumably penetrates laterally toward west, from region somewhere between ponors at Laze village and Vetrovna jama. Secondary flood pulse between November 10th and 13th (it is framed in the figure) was too low to recharge Gradišnica from Najdena jama. Najdena jama did not response at all. However, hydraulic response of Gradišnica was significant and relatively less in Vetrovna jama. It is assumed that majority of the discussed underground flood pulse is derived from "Laška žaga" ponor and it may be also penetrated laterally (through Slavendol fault) toward Gradišnica. Some unknown proportion of flood pulse reached Vetrovna jama.

redko preseže 15 m nakazuje možnost, da poteka bočno odvajanje neznanega deleža vodnega toka proti zahodu le na določeni relativni višini. Ker naj bi se pretakanje proti zahodu vršilo nekje gorvodno od Vetrovne jame, to pomeni, da se del podzemnega vodnega toka izogne Vetrovni jami in nima vpliva na nadaljnjo naraščanje vodostaja v njej. Vodni nivo v Vetrovni jami naj ne bi narasel prek relativne višine 15 m.

- Ob najvišjih izmerjenih pretokih površinske Unice (nad 50 m³/s) nivo vode v Vetrovni jami za več metrov preseže 15 m (sl. 4, 5). Ob dvigu vode v strugi požiralnikov in aktivaciji dodatnih požiralnikov, del tega presežnega toka doseže tudi Vetrovno jamo. Torej morebitni »prečni« prevodni horizont ne odvede vsega toka.

Vpliv vodnega toka v Gradišnici, ki prihaja iz ponora Laška žaga ali predstavlja vir domnevnega bočnega pretakanja, je popolnoma zabrisan v primeru, ko je pretok Unice dovolj velik (nad 30 m³/s), da napaja Gradišnico prek severnih požiralnikov in Najdene jame. Ta tok je namreč prevladujoč (sl. 1, 7 – primerjaj odsek med 27. oktobrom in 7. novembrom z odsekom med 9. in 14. novembrom). Količina podzemne Unice, ki naj bi prihajala iz ponora Laška žaga ali z območja bočnega podzemnega pretakanja, naj bi bila relativno majhna.

Tretja razlaga, ki se nam poraja kot dopolnilna možnost, je manj verjetna. Voda, ki odteče iz Vetrovne jame, bi lahko vplivala na vodostaj v Gradišnici. Generalne smeri pretakanja podzemne vode tej tezi močno nasprotujejo (primerjaj legi obeh jam na sl. 1).

Sklep

Nivo podzemne vode v Najdeni jami, Gradišnici in Gašpinovi jami niha zelo usklajeno. Izjema je le Vetrovna jama, ki pa je najvzhodnejša od vseh štirih jam. Značilnega, hipotetičnega hidravličnega padca med Vetrovno jamo in obravnanimi drugimi jamami ni mogoče določiti. Na podlagi tega dejstva postavljamo domnevo, da lahko vodonosnik severno od Planinskega polja delimo na dva dela, na »zahodni« in »vzhodni« del. Na podlagi naših meritev se nagibamo k mnenju Šušteršiča (2002), da naj bi mejo med njima predstavljala struktura, vezana na raven niz udornic od Slaven dola v smeri proti Malemu Dovcu. To geološko strukturo je Šušteršič (2002) interpretiral kot Slavendolski prelom (sl. 1). Po njegovem prepričanju predstavlja zdrobljena cona Slavendolskega preloma pomembno hidrogeološko prepreko.

V skladu s Šušteršičevimi ugotovitvami se sklada hipoteza, da ponor Laška žaga (v neposredni bližini Laz) lahko pomembno vpliva na hidrogram v Gradišnici, ne pa tudi v Vetrovni jami. Laška žaga se namreč nahaja na zahodni strani Slavendolskega preloma, tako kot Gradišnica. V prihodnosti bo potrebno pomen tega ponora vsekakor še natančno preučiti. Obstajajo določeni utemeljeni sumi, da zdrobljena cona Slavendolskega preloma vendarle ni popolnoma neprepustna za pretakanje podzemne vode. Prelomna cona s smerjo J-S, naj bi vzdolžno »puščala«, oziroma dovoljevala pretakanje neznanne (manjše?) količine vode iz JV na SZ. Zelo verjetno obstajajo celo določeni bočni kanalski prevodniki, ki presekajo Slavendolski prelom.

Meritve na treh lokacijah »zahodnega« dela vodonosnika lahko smatramo za reprezentativne, tako s hidrogeološkega, kot hidravličnega vidika. Za našo razpravo je nekoliko problematično dejstvo, da je bila Vetrovna jama edina merilna točka znotraj »vzhodnega« območja vodonosnika, za katerega sklepamo, da ima drugačne značilnosti. Postavlja se vprašanje ali lahko na podlagi meritev na zgolj eni točki sklepamo, da sta »vzhodno« in »zahodno« območje vodonosnika v času istočasnih meritev delovali deloma neodvisno eno od druge. Ta predpostavka temelji na predhodni predpostavki, da je Vetrovna jama reprezentativna za del vodonosnika vzhodno od Slavendolskega preloma. Nekateri predhodni raziskave kažejo da je reprezentativna, saj je nihanje podzemne vode v sosednji jami Logarček zelo podobnega velikostnega reda (GOSPODARIČ & HABIČ, 1976). Kljub vsemu bodo morala biti naša dognanja v prihodnosti preverjena z meritvami na dodatnih točkah v vodonosniku (vodnih jamah, ki še čakajo na odkritje).

Zahvala

Avtorja članka se za pomoč pri obiskovanju Vetrovne jame lepo zahvaljujeva g. Bojanu Volku, ki ima velike zasluge za našo raziskavo. Zahvala gre tudi g. Marku Erkerju (oba JD Logatec). Načrt jame je izdelal g. Miran Nagode, ki je skupaj z g. Bojanom Volkom odkril vodne dele Vetrovne jame. Načrt objavljamo z njunim dovoljenjem, za kar jima pripada posebna zahvala.

Literatura

- BREZNIK, M. 1998: Storage Reservoirs and Deep Weels in Karst Regions. A. A. Balkema Publishers (Rotterdam): 1–251.
- ČAR, J. 1982: Geološka zgradba požiralnega obroba Planinskega polja. *Acta Carsologica* (Ljubljana) X: 75–104, 1981.
- GABROVŠEK, F. & PERIC, B. 2006: Monitoring of the flood pulses in the epiphreatic zone of karst aquifers: the case of Reka river system, Karst plateau, SW Slovenia. *Acta Carsologica* (Ljubljana) 31/1: 35–45.
- GAMS, I. & HABIČ, P. (eds.) 1987: Man's impact in Dinaric karst, Guide book. Department of Geography, Faculty Letters, University »E. Kardelj« in Ljubljana and Institute for Karst Research SAZU in Postojna (Ljubljana): 1–205.
- GOSPODARIČ, R. & HABIČ, P. (eds.) 1976: Underground water tracing – Investigations in Slovenia 1972–1975. Institute for Karst Research SAZU (Ljubljana): 1–309.
- KRIVIC, P., VERBOVŠEK, R. & DROBNE, F. 1976: Hidrogeološka karta (območja med Cerknico, Idrijo in Vrhniko) 1:50 000 (*Hydrogeological map of area between Cerknica, Idrija and Vrhnika*), Geološki zavod Ljubljana.
- MICHLER, I. 1954–1955: Planinska dolina. *Proteus* (Ljubljana) 17: 1–10.
- PALMER, A.N. & PALMER, M.V. 2006: Hydraulic considerations in the development of tiankengs. *Speleogenesis* 4/1: 1–8.
- PLENIČAR, M. 1970: Tolmač osnovne geološke karte 1 : 100.000 za list Postojna (Beograd): 1–58.
- STEPIŠNIK, U. 2006: Ilovate zapolnitve v udornicah v zaledju izvirov Ljubljanice. *Razprave Dela* 26 (Ljubljana): 75–89.
- ŠEBELA, S. 1998: Tektonska zgradba sistema Postojnskih jam (Tectonic Structure of Postojnska jama Cave System). ZRC SAZU (Ljubljana): 1–119.
- ŠUŠTERŠIČ, F. 2002: Where does underground Ljubljana flow? *RMZ – Materials and geoenvironment* (Ljubljana) 49/1: 61–84.
- ŠUŠTERŠIČ, F., ČAR, J. & ŠEBELA, S. 2001: Zbirni kanali in zaporni prelomi. *Naše jame* (Ljubljana) 43: 8–22.
- ŠUŠTERŠIČ, F. 2000: Are collapse dolines formed only by collapse? (Ali so udornice zgolj posledica udora?), *Acta Carsologica* (Ljubljana) 29/2: 213–230.
- TURK, J. 2008: Hidrogeologija Gradišnice in Gašpinove jame v kraškem vodonosniku med Planinskim poljem in izviri Ljubljanice (*Hydrogeology of Gradišnica and Gašpinova jama caves in karst aquifer between Planinsko polje and Ljubljana springs*). *Geologija* (Ljubljana) 51/1: 51–58.
- XUWEN., Z. & WEIHAI, C. 2006: Tiankengs in the karst of China. *Speleogenesis* 4/1: 1–18.

Navodila avtorjem

GEOLOGIJA objavlja znanstvene in strokovne članke s področja geologije in sorodnih ved. Revija od leta 2000 izhaja dvakrat letno v obsegu 30 avtorskih pol. Vse prispevke recenzirajo domači ali tuji strokovnjaki s področja, ki ga prispevek obravnava. Avtorji so dolžni pisno mnenje recenzentov upoštevati, ter svoje prispevke po potrebi tudi dopolniti.

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 istega prispevka.

Jezik: Članki so lahko napisani v slovenskem ali angleškem jeziku, vsi pa morajo imeti slovenski in angleški izvleček. Za prevod poskrbijo avtorji prispevkov sami.

Vrste prispevkov:

Izvirni znanstveni članek

Izvirni znanstveni članek je samo 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, evalviranja ali sintetiziranja informacij, 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 dokazuje pravilnost nekega dela, objavljenega v Geologiji ali z avtorjem strokovno polemizira.

Recenzija, prikaz knjige

Prispevek, v katerem avtor predstavlja vsebino nove knjige s področja geologije.

Oblika prispevka: Besedilo naj bo napisano na listih formata A4 z dvojnimi presledki, da je dovolj prostora za popravke in pripombe recenzentov. Najbolje je, da pripravite besedilo v ureje-

valniku Microsoft Word. Prispevki naj praviloma ne bodo daljši od 25 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.

Prispevke oddajte uredništvu v enem tiskanem izvodu, vključno z vsemi slikami in preglednicami ter identično kopijo v elektronski obliki po naslednjem sistemu:

- *Naslov prispevka* (tudi v tujem jeziku)
- *Avtor / avtorji*
- *Ključne besede in Key words*
- *Izvleček in Abstract*
- *Tekst*
- *Literatura*
- *slike, tabele in table*

Naslovi prispevkov naj bodo kratki in naj praviloma ne presegajo 12 besed. Poleg polnega imena in priimka naj podajo avtorji tudi svoj naslov in e-pošto. Vsebine oziroma kazala pri normalno dolgih prispevkih ne objavljamo, zaželene pa niso niti opombe na dnu strani.

Citiranje: V literaturi naj avtorji prispevkov praviloma upoštevajo le tiskane vire. Rokopise naj navajajo le v izjemnih primerih z navedbo, kjer so shranjeni. V seznamu literature navajajte samo v prispevku omenjena dela. Med besedilom prispevka citirajte samo avtorjev priimek z inicialko njegovega imena, 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). Literaturo navajajte po abecednem redu avtorjev.

Imena fosilov (rod in vrsto) pa naj pišejo poševno. Pri citiranju rodov in vrst oziroma višjih taksonomskih enotah se imena avtorjev le teh pišejo normalno, npr. *Apricardia pachiniana* Sirna.

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.*, (Berlin) 51/8: 1401–1412.

PLENIČAR, M. 1993: *Apricardia pachiniana* Sirna from lower part of Liburnian beds at Divača (Triest–Komen Plateau). *Geologija* (Ljubljana) 35: 65–68.

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 (Ljubljana) 34 (2): 129–154, incl. 10 pls.

Primer citirane knjige:

FLÜGEL, E. 2004: Mikrofacies of Carbonate Rocks. Springer Verlag (Berlin): 1–976, cd-rom.

JURKOVŠEK, B., TOMAN, M., OGORELEC, B., ŠRIBAR, L., DROBNE, K., POLJAK, M. & ŠRIBAR, L.J. 1996: Formacijska geološka karta južnega dela Tržaško-komenske planote – Kredne in paleogene kamnine 1 : 50.000. [Geological map of the southern part of the Trieste–Komen plateau – Cretaceous and Paleogene carbonate rocks]. Geološki zavod Slovenije (Ljubljana): 1–143, incl. 23 pls, 1 geol. map.

Slike, tabele in table: Slike (ilustracije in fotografije), tabele in table morajo biti zaporedno oštevilčene in označene kot sl. 1, sl. 2 itd., narejene v računalniškem programu (MS Excel, Word ali CorelDRAW), oddane v formatu TIFF, JPG ali EPS z ločljivostjo 300 dpi. Le izjemno je možno objaviti tudi barvne slike, vendar samo po predhodnem dogovoru z uredništvom. Obvezno je treba upoštevati zrcalo revije **172 x 259 mm**. Revija bo od leta 2008 po sklepu uredniškega odbora pričela izhajati v A4 formatu z dvokolonskim tiskom. 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«. Slike obeležite s številkami. 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. Table pripravite v formatu zrcala naše revije.

Podnaslove k slikam, tabelam in tablam, ki morajo biti napisani v obeh jezikih, avtorji priložijo na posebnih listih enega pod drugim. Zato teh podnaslovov ne pišete med besedilom prispevka. Podnaslovi naj bodo po možnosti čim krajši.

Korekture: Te opravijo avtorji prispevkov, ki pa lahko popravijo samo tiskarske napake. Krajši dodatki ali spremembe pri korekturah so možne samo na avtorjeve stroške.

Pošiljanje prispevkov: Uredništvo sprejema prispevke do vključno 1. marca za prvo številko in najkasneje do 1. septembra za drugo številko v tekočem letu in se obveže, da bodo le-ti tiskani v tekočem letu, v kolikor bodo avtorji upoštevali pripombe recenzentov.

Avtorji prejmejo 25 separatov brezplačno, sicer pa so prispevki dostopni tudi na internetnih straneh <http://www.geologija-revija.si>

Avtorje prosimo, da prispevke pošiljajo na naslov uredništva:

GEOLOGIJA
Geološki zavod Slovenije
Dimičeva ulica 14, 1000 Ljubljana ali
urednik@geologija-revija.si

Uredništvo Geologije

Instructions for contributors

GEOLOGIJA publishes research and professional papers covering all aspects of geology and related sciences. The journal is issued from 2000 on twice a year in an extent of 30 authorial sheets (240 printed pages) All contributions are reviewed by Slovenian or foreign experts from the field treated by the paper. Authors are obliged to take into account their written reviews, and complete accordingly the contribution, if necessary.

Authorship: Authors are responsible for the originality of data, and especially for opinions, ideas, conclusions and the cited references. By publishing in *Geologija*, they are in addition obliged not to publish the same contribution elsewhere.

Language: Papers may be written in Slovenian or English, and all must contain an abstract in Slovenian and in English. The translation is at care of the authors.

Kinds of contributions:

Original scientific article

An original scientific article is only the first publication of original research results in such a form that the research could be repeated and the findings verified. As a rule it should be organized according to the IMRAD scheme (Introduction, Methods, Results, And Discussion).

Review scientific article

A review scientific article is a review of the latest works on a given field, of works of an individual researcher, or of a research group with the aim of summarizing, analyzing, evaluating or synthesizing the already published informations. It contains new syntheses that include also results of the author's own research.

Professional article

A professional article is a presentation of already known material with emphasis on the use of results of original research and on the propagation of knowledge.

Discussion and polemics

A contribution in which the author evaluates or demonstrates the correctness of a contribution that was published in *Geologija*, or in which he/she competently polemizes with the author.

Book review

A contribution in which the contents of a book from the field of geology are presented.

Format of contribution: The manuscript should be written on A4 size pages with double spacing to allow enough space for corrections and comments of reviewers. The contribution should be preferably edited on a Microsoft Word word processor. As a rule contributions should not be longer than 25 A4 size pages comprising also figures, tables and plates. Longer contributions can be submitted only exceptionally after a previous agreement with the Editor.

Contributions should be submitted to the Editorial Board in a hard copy including all figures and tables, and in an identical copy in electronic form according to the following system:

- *Title of contribution* (also in foreign language)
- *Author/s*
- *Key words*
- *Abstract*
- *Text*
- *References*
- *Figures, tables and plates*

Titles of contributions should be short, as a rule not longer than 12 words. In addition to their full given name and surname the authors should indicate also their address and electronic mail address. Tables of contents with normal sized contributions are not published, and also footnotes are discouraged.

Referencing: References should contain as a rule only printed sources. Manuscript sources could be cited only exceptionally with the information on where they are available. The references cited in the text should be given in the reference list and vice versa. In the text only the surname of the author(s) with initial of the name should be cited, followed in parentheses by the year of publication and, if necessary, also the page. When citing a publication by two authors, in the text both authors' surnames should be given (e.g. PLENIČAR & BUSER, 1967), and in case of three and more authors only the first author's surname followed by et al. and the year (e.g. MLAKAR et al., 1992). The reference list should be arranged in alphabetical order of first authors. Names of fossils (genus and species) should be italicised. Authors' names in citing fossils should be written in normal type, e.g. *Apricardia pachiniana* Sirna.

References cited should follow the examples shown below:

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.*, (Berlin) 51/8: 1401–1412.

- PLENIČAR, M. 1993: *Apricardia pachiniana* Sirna from lower part of Liburnian beds at Divača (Triest–Komen Plateau). *Geologija* (Ljubljana) 35: 65–68.
- 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 (Ljubljana) 34 (2): 129–154, incl. 10 pls.

Examples of book references:

- FLÜGEL, E. 2004: *Mikrofacies of Carbonate Rocks*. Springer Verlag (Berlin): 1–976, cd-rom.
- 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): 1–143, incl. 23 pls, 1 geol. map.

Figures, Tables and Plates: Figures (illustrations and photographs), tables and plates should be numbered consecutively and marked as fig. 1, fig. 2. etc. They should be produced with a suitable computer program (MS Excel, Word, CorelDraw the like), and submitted digitally in the TIFF, JPG or EPS format with 300 dpi resolution. Color figures could be published only exceptionally, and in prior arrangement with the Editor. The **172 x 259 mm** journal page format must be obligatorily considered. According to the decision of Editorial Board from 2008 on the journal is being printed in two columns on an A4 page size. Figures on folding leaflets of sizes larger than the mentioned GEOLOGIJA page size will not be printed, but figures

larger or longer than that may be printed on two pages (on left and on right page) with a cut in-between. Figures shall be marked by numbers. In the text each figure should be mentioned in the proper numerical order. Permissions for publishing pictorial material from other journals, publications and books should be arranged by the authors. Plates should be prepared in the journal's page size format.

Captions to figures, tables and plates, written in both languages, are supplied by author on separate pages and listed one below the other. Please, do not write captions in the text of the contribution. If possible, captions should be concise.

Proofreading: Page proofs should be read by the authors, but they ought to correct only printing errors. Shorter additions or modifications are possible only at the author's expense.

Offprints. Authors will receive 25 offprints free. The contributions are accessible also on the website <http://www.geologija-revija.si>.

Submitting of contributions: Editorial board is accepting the contributions to 1st March for the first issue, and to 1st September for the second issue of the year, and guarantees to publish them in the given year, provided they consider the reviewers' observations.

Authors are asked to send their contributions to the mail address:

GEOLOGIJA
Geološki zavod Slovenije
Dimičeva ulica 14, SI-1000 Ljubljana
or to the electronic address:
urednik@geologija-revija.si

Editorial Board of Geologija

- 5 Kolar-Jurkovšek, T. & Jurkovšek, B.
Holoturijski skleriti iz karnijskih plasti okolice Mežice
- 11 Dozet, S.
Mohorje Formation, Southern Slovenia
- 21 Kralj, P. & Dozet, S.
Volcanic succession of the Borovnik Member (Mohorje Formation), Bloke Plateau area, Central Slovenia
- 29 Pleničar, M. & Jurkovšek, B.
***Pseudopolyconites slovenicus* n.sp. resedimented to Paleocene flysch breccia of the Soča river valley (Slovenia)**
- 33 Mikuž, V.
Navtilid iz srednjeocenskih plasti pri Grdoselu v Istri na Hrvaškem
- 43 Budkovič, T., Čarman, M. & Petkovšek, B.
Geologija avtocestnega predora Pletovarje
- 49 Skaberne, D., Kralj, P. & Budkovič, T.
Tla na zgornjetriasnih karbonatnih kamninah Zahodnih Karavank in visokih planot Julijskih Alp
- 69 Miler, M. & Gosar, M.
Application of SEM/EDS to environmental geochemistry of heavy metals
- 79 Tersič, T. & Gosar, M.
Preliminary results of detailed geochemical study of mercury at the ancient ore roasting site Pšenk (Idrija area, Slovenia)
- 87 Komac, M., Kumelj, Š. & Ribičič, M.
Model dovzetnosti pojavljanja drobirskih tokov v Sloveniji v merilu 1 : 250.000
- 105 Komac, M.
Vloga javnega inštituta geološkega zavoda pri preprečevanju geohazardov in zmanjševanju njihovih posledic
- 113 Prestor, J., Strosser, P., Bouscasse, H., Krivic, J. & Eržen, N.
Which monetary values for the quality of our environment? The example of pollution in the Krška kotlina alluvial aquifer in Slovenia
- 127 Petrič, M.
Pregled sledenja voda z umetnimi sledili na kraških območjih v Sloveniji
- 137 Turk, J.
Hidrogeologija Vetrovne jame v vodonosniku severno od Planinskega polja